中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

土地利用对水体营养物影响的研究进展

许尔琪

引用本文:
许尔琪. 土地利用对水体营养物影响的研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(12): 1880–1891.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190110

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

喀斯特山地土地利用变化的垂直分布特征

Vertical distribution of land use in karst mountainous region

中国生态农业学报. 2016, 24(12): 1693–1702 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160456

怀来县土地利用格局的影响因子分析

Analysis of landscape pattern and affecting factors in Huailai County

中国生态农业学报. 2016, 24(7): 957–968 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.151225

基于改进指数和法的地形因素对土地利用变化影响程度评价

Evaluation of influencing of terrain factors on land use change based on improved Index Sum Method

中国生态农业学报. 2018, 26(3): 442–452 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170593

鄂尔多斯高原泊江海子流域土地利用动态变化及驱动因素分析

Characteristics and driving factors of land use change in the Bojiang Lake Basin in Ordos Plateau, China

中国生态农业学报. 2017, 25(11): 1693–1706 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170012

伊洛河上游流域退耕还林/还草对蓝水绿水分配的影响

Green/blue water allocation as affected by Grain–for–Green practices in the upper reaches of the Yiluo River

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(9): 1409–1420 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190032

中国生态农业学报(中英文) 2019 年 12 月 第 27 卷 第 12 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Dec. 2019, 27(12): 1880−1891

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190110

许尔琪. 土地利用对水体营养物影响的研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(12): 1880−1891
XU E Q. Research progress in the impact of land use on water nutrients[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(12): 1880−1891

土地利用对水体营养物影响的研究进展*

许尔琪

(中国科学院地理科学与资源研究所陆地表层格局与模拟重点实验室 北京 100101)

摘 要: 日益严重的水质污染威胁到人类健康与生存, 水体富营养化是其中一大治理难题。流域土地利用深刻影响水体中的营养物, 定量刻画两者关系, 可有效指导土地利用优化以改善水体质量。在国内外研究的基础上, 本文梳理了样地实验、统计分析、经验模型和机理模型等 4 类研究土地利用和水体营养物关系的方法, 并分析了不同方法应用的优缺点。以往研究多侧重土地利用数量结构, 对强度和空间分布的量化及其与水体营养物关系的模型构建等研究尚显不足, 多从单一或部分信息进行松散研究, 导致不同研究中土地利用对水体营养物的解释能力差异显著。本文着重综述土地利用类型、强度差异和空间分布等 3 个方面对水体营养物影响的研究进展, 并阐述关于两者定量关系尺度效应的争议和不确定性。目前主要存在问题包括现有研究土地利用和水体营养物的关系手段不足、土地利用多组分信息和水体营养物关系规律不清和尺度效应不确定性等 3 方面。因此, 本文以水体污染物的产生、迁移、转化等的生态水文过程为线索, 提出土地利用多信息空间综合表达和量化研究框架作为核心突破口。应用该框架, 未来围绕融合过程机理与经验统计的模型开发、富营养化过程关联的土地利用多信息综合量化和多尺度结构的构建等 3 个方面开展研究, 旨在为丰富土地利用对水体营养物影响研究提供一定的参考价值。

关键词: 土地利用; 水体营养物; 量化手段; 强度信息; 空间分布; 尺度效应

中图分类号: X171

文章编号: 2096-6237(2019)12-1880-12 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Research progress in the impact of land use on water nutrients*

XU Erqi

(Key Laboratory of Terrestrial Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Increasingly severe water pollution is a threat to human health and survival, and eutrophication is one of the main challenges faced by pollution governance. Because land use is closely related to water nutrients, quantifying the relationship would be an effective way to support the optimization of land use to improve water quality. Based on international and domestic researches, this study reviewed four methods, e.g., plot experiments, statistical analysis, empirical models, and mechanism models, for studying the effects of land use on water nutrients. The advantages and disadvantages of the application of each method were examined. Until now, studies have been conducted mainly to characterize the quantitative structures of land use. However, there is a limitation in the quantification of the intensity and spatial distribution of land use, and a model of the relationship between land use information and water nutrients is lacking. Research progress has found that multiple land use in-

* 国家自然科学基金项目(41601095)和中国科学院 A 类战略性先导科技专项(XDA19040305)资助
许尔琪, 主要从事土地利用及空间格局、生态环境效应研究。E-mail: xueq@igsnrr.ac.cn
收稿日期: 2019-02-17 接受日期: 2019-07-05

* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (41601095) and the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA19040305).
Corresponding author, XU Erqi, E-mail: xueq@igsnrr.ac.cn
Received Feb. 17, 2019; accepted Jul. 5, 2019

formation was loosely studied from an individual or a partial perspective. This easily led to a significant difference in the explanatory power of land use on water nutrients in different case studies. Thus, research progress was particularly summarized on how three aspects of land use information (land use type, use intensity, and spatial distribution) influence water nutrients. The controversy and uncertainty about the scale effect of the quantitative relationship between land use and water eutrophication have been discussed. The main shortcomings of recent studies were concluded, which included the inadequate capability of approaches for correlating land use to water nutrients, unclear mechanism underlying multiple land use information related to water nutrients, and uncertainty about the abovementioned scale effect. To resolve these issues, this study proposed a breakthrough framework of comprehensive expression and quantification of multiple land use information space that was based on the ecohydrological processes affecting the export, migration, and transformation of water nutrients. Using this proposed multiple land use information space, future studies could focus on integrating process mechanism and empirical statistical methods, comprehensively quantifying multiple land use indicators related to eutrophication, and constructing multiscale structures of land use affecting water nutrients. This study can provide a guide for deep investigation of the relationship between land use and water nutrients.

Keywords: Land use; Water nutrient; Quantification approach; Intensity information; Spatial distribution; Scale effect

由于自然环境改变和不合理人类活动导致的水体富营养化，是当今世界水污染治理的一大难题[1]。尤其是随着工业点源污染控制水平的提高，点源污染已基本得到有效控制，而非点源污染则成为当今包括河流、湖泊、水库等水体富营养化的主体[2]。相对于点源污染，非点源污染具有随机性、广泛性、滞后性和模糊性的特征[3]，使得水体富营养的调控和管理更具挑战性，亟须从区域尺度对水质污染进行宏观规划和设计[4]。流域陆地表面的营养物随径流汇入水体，进而引起富营养化，该过程受到降雨、地表径流、下垫面特征和人类活动等因素的综合影响[5]。土地利用作为人类活动的综合表征，与水体中营养物产生、迁移、转化等相关的产汇流过程[6]和生物化学过程[7]密切相关，定量刻画两者的关系，厘定土地利用对水体中营养物的影响，才能有效控制水质污染。

由于土地利用与水体营养物关系密切[8]，关于两者关系的研究国内外已有较多成果。不同土地利用类型决定营养物输出的高低，农地利用和城镇利用往往是水体营养物的输出来源[9-10]，而林地又能够有助于营养物的控制[11]；利用强度的差异将导致同一土地利用类型污染物输出的显著差别，如建设用地密度[12]、种植和畜禽养殖强度[13-14]等的增加，都会使这些用地作为污染物输出的源强增加；土地利用空间分布特征也与水体营养物的产生、迁移转化及拦截调控过程密切相关[15]，土地利用所处的坡度差异刻画了营养物输出风险的高低[16]，土地利用与河道和监测断面距离的远近模拟了营养物输出在坡面汇流及河道汇流的衰减过程，土地利用位置邻接关系的空间识别反映了特定位置上林地对地表径流营养物的削减作用[17]。

由于土地利用自身的异质性，使得土地利用和水质污染之间的关系更为复杂，若无法充分表达土地利用多组分信息的差异，则容易导致研究结果产生不确定性。目前国内外研究两者关系侧重刻画土地利用的数量结构，缺乏对其空间分布、管理与强度的理解和量化，使得不同研究中单纯采用土地利用数量比例对水体营养物解释程度的统计指标有较大的差异性，这样的不确定性影响了对两者关系的深入认识[15]。因此，本文旨在介绍和阐述研究土地利用对水体营养物影响的技术手段，重点阐述土地利用多组分信息量化及其与水体营养物关系的研究进展，剖析目前研究的问题和不足，探讨未来的主要研究方向。

1　土地利用对水体营养物影响的研究方法

1.1　样地实验

样地尺度的实地取样监测和人工降雨模拟，是早期研究和考察土地利用污染物输出差异的主要手段，通过对典型样区定位监测数据，获取不同土地利用类型的污染物输出特征，探讨土地利用对水体中营养物的影响，直到现在仍是研究两者关系的基础手段[18]。Uttormark 等[19]通过对不同土地利用类型的单位面积年均污染物浓度的比较，指出城市用地流出径流的污染物浓度最大，而林地最小；Haith[20]研究了土地利用类型对纽约河流水质的影响，并建立了两者之间简单的经验统计模型；Omernik 等[21]收集了遍布美国的 928 个流域的水体营养物污染的情况，研究了不同土地利用类型的水体营养水平。

在国内，不同学者也采用样地设置和小区实验

的手段，进行基础数据积累，并研究土地利用和营养物输出关系。杨金玲等[22]运用实地跟踪定位监测方法，监测安徽宣城梅村流域不同土地利用结构的农林生态系统地表径流水的氮含量，探讨其与流域土地利用的定量关系；梁涛等[23-24]利用人工降雨模拟器模拟暴雨，研究西苕溪流域和官厅水库周边不同土地利用方式上氮、磷随暴雨径流及径流沉积物的迁移过程，并估算了总氮、总磷的流失速率；余进祥等[25]定点监测鄱阳湖流域水田、水旱轮作、旱地、菜地、桔园、脐橙园和茶园等不同农业利用方式，分析其氮、磷输出特征和年输出负荷；汪庆兵等[26]通过在毛竹林地设置径流小区，定期采集径流水样测试，分析了浙北安吉赋石水库集水区毛竹林地表径流氮、磷的流失特征；陈成龙等[27]利用田间监测数据分析了三峡库区典型农业小流域不同土地利用类型与坡面地表径流氮磷浓度的相互关系。

1.2 统计分析

遥感技术和地理信息系统的发展，推动了大范围土地利用特征的获取，研究趋向于流域出口水质监测数据和遥感识别的土地利用信息，并运用经典统计分析方法定量研究流域尺度上土地利用数量结构、变化特征对水体营养物的影响及其贡献程度。Detenbeck 等[28]结合航测影像和 GIS 技术，研究美国明尼阿波利斯-圣保罗郊区农用地和林地面积百分比对水域水质的影响；Johnson 等[29]通过美国密西根中部 62 个流域支流研究，建立了不同土地类型面积比例和坡度与水质指标之间的多元回归模型，发现对水质影响最大的是土地利用指标；Ahearn 等[30]研究了美国加州西部内华达山区土地利用和覆被类型对水质的影响，并得出 1999—2001 年间土地利用变化与水体中硝态氮和总悬浮颗粒物含量具有相关性；Broussard 等[31]研究认为过去百年美国的流域土地利用变化与硝态氮浓度存在显著的相关性。

国内学者建立不同流域土地利用类型面积比例与营养物浓度的定量关系[32]，应用 GIS 技术和地统计学方法，定量刻画区域范围内流域土地利用数量结构与径流营养物浓度水平的关系[33]。李俊然等[34]以子流域为单元，研究了蓟运河于桥水库流域内不同土地利用结构与非点源污染之间的相关关系；于兴修等[35]运用 GIS 技术和水质指数法分析西苕溪流域的土地利用变化对氮素径流流失过程的影响，指出土地利用变化是引起养分流失加剧、继而导致水质变化的主要原因；岳隽等[36]探讨了深圳市境内 5 条河流水质的时空变化与相应流域内耕地、园地和建设用地数量的对应关系及其相互影响；吴东等[32]应用逐步回归模型，分析了三峡库区兰陵溪小流域退耕还林后土地利用结构变化对氮素输出的控制效应。

1.3 经验模型

随着样地尺度定位监测和流域尺度统计分析等方法的长期应用和参数积累，经验统计模型被提出并广泛应用，通过文献检索和参数筛选，经验模型得以定量化土地利用与水体营养物的关系，估算不同污染源类型的污染负荷。经验性模型以输出系数模型为代表，其以土地利用输出系数为基础，建立流域土地利用类型与水体营养物输出量的关系，核算不同来源的污染负荷。自 Reckhow 等[37]首次较完整地以不同土地利用类型输出系数为基础建立了水体营养物输出系数模型以来，因输出系数模型避开了污染发生的复杂过程，所需参数少，又具有一定的精度和适用性，众多学者针对输出系数模型的核心——输出系数进行参数率定和积累，模型得到快速发展和广泛应用[38-39]。

同时，输出系数模型对水体营养物相关生态水文过程处理较为简单，容易忽略部分关键信息，因此，国内外学者对模型进行了逐步的修正、扩展和应用。Johnes[40]在模型中加入了牲畜、人口等因素的影响；Worrall 等[41]针对污染物的水文过程，进一步考虑了土地利用变化对污染物输出系数的滞后效应；Endreny 等[42]则认为径流速率存在着空间分布模式，主要受径流过程中负荷大小和过滤作用的影响，建立了基于 GIS 的贡献消散区-输出系数模型；Khadam 等[43]提出了侵蚀级的输出系数模型，引进了沉积排放参数来代替水文的变化性；任玮等[44]引入降雨、地形因子对输出系数模型进行改进；庞树江等[45]提出了综合考虑产污强度、降雨径流、土壤水分下渗和流域下垫面植被景观截留等作用的氮输出系数模型。

1.4 机理模型

机理模型远比经验模型复杂，大多依据水文学原理，以水体污染物的发生、迁移和转化的具体过程为框架，通常包括产流、汇流、污染物转化和水质等子模型，涉及参数较多，具有不同的数学基础和模型算法，有许多学者对一系列模型进行了介绍和比较[46-47]，机理性模型的发展从 20 世纪 70 年代初的提出到现在走向综合，主要有：连续模拟土壤和营养物质从农耕地上流失的 ANSWERS 模型[48]，综合模拟水文、侵蚀、沉积和化学传输等过程的子

流域农耕地非点源污染 AGNPS 模型[49]及其扩展的 AnnAGNPS 模型[50-53], 预报侵蚀产沙和农业面源污染相结合的 EPIC 模型[54], 美国农业部开发的适用于较大流域尺度的面源污染负荷计算 SWAT 模型[55]等。这些模型及其修正版本被广泛应用, 为水体富营养化的研究和控制提供有利工具, 水质污染模型呈现出向集成系统发展的趋势。

机理模型偏重水质污染物产生至最终污染输出全过程的刻画, 尽管对土地利用数据要求相对简单, 如 SWAT 或者 AGNPS 等机理模型运转所需的土地利用数据只是土地利用类型、结构及其变化即可, 但这一数据却是模型运转的基础性数据, 土地利用方式对模型运转结果有显著性影响。Romanowicz 等[56]研究指出 SWAT 模型对土地利用这一基础性的输入数据非常敏感。国内外学者基于机理模型, 以流域土地利用类型、结构及变化为模型基本参数, 结合流域地形、土壤、水文气象数据、河流情况与参数数据以及流域管理措施数据等, 定量研究不同尺度流域的营养物负荷量及其比重, 通过历史土地利用变化以及未来土地利用情景设计, 探讨不同土地利用结构及其时空变化对流域营养物输出的影响, 如 SWAT 模型被秦耀民等[57]、刘博等[58]和马放等[59]应用于黑河流域、北京沙河水库流域和阿什河流域等地区, 探讨土地利用与非点源污染的关系。

2　土地利用对水体营养物影响研究进展

2.1　土地利用类型对水体营养物的影响

20 世纪 60 年代以来, 发达国家由控制点源污染转向非点源污染的研究与治理, 70 年代国外学者开始关注人类土地利用活动对水库、湖泊、河流等水质的影响。国内学界开展土地利用对水体富营养化影响研究相对滞后于国外, 真正意义上的研究始于 20 世纪 80 年代初的湖泊、水库富营养化调查和河流水质规划[60], 通过典型样区试验建立土地利用类型与水体营养物的简单关系, 进而粗略估算汇水区域水质污染物的输出总量。这一阶段的研究数量少, 监测手段相对简单, 属于对土地利用类型与水体营养物之间关系的探索阶段。

基于样地数据和输出系数模型, 相关学者研究不同土地利用方式的水体营养物输出差异。如 Frink[61]详细汇总了以往美国所有研究获得的不同土地利用方式下总氮、总磷输出系数; Zobrist 等[62]估计了瑞士 24 年间不同土地利用类别下可溶性活性磷、硝酸盐、总氮、氯化物、钾等的输出系数。早期的大量研究就不同土地利用类型对水体营养物的影响有了基本的定性判断。一般认为, 建设用地导致地表非渗透表面的增加, 从而改变径流过程, 引起水质污染[63], 并且, 城市化导致径流增加, 引起水体包括需氧量、悬浮物和营养物质以及病原菌和藻类等的增加, 造成水质污染[64]; 而农地利用输出的污染物是水体营养物的重要组成部分, 农用地与水体富营养化有显著相关关系[65], 如水体中的硝酸盐浓度与农用地密切相关[66]; 至于林地则认为能够截留和过滤水体中的污染物和浓度[67], 有效改善水体质量。

2.2　土地利用强度对水体营养物的影响

当前大多数学者将视角集中在土地利用类型、结构与水质污染关系上, 采用上文提及的多种手段, 分析两者的关系。随着研究的深入, 国内外学者开始认识到土地利用强度的影响, 认为单单讨论土地利用结构不同而忽视其强度差异, 将影响土地利用对水体污染解释的程度[68-69]。实际上, 即便是子流域具有相似的土地利用数量结构和比例, 土地利用强度的差异将导致流域水质参与的显著差别[12]。然而, 在目前研究中土地利用强度的量化和测度却并不多见[70]。

目前, 少数研究中根据土地利用强度的差异对土地利用类型进行细分, 如 Zhang[71]将建设用地分为高密度和低密度居民用地, Su 等[72]根据人口密度、GDP 和建设用地斑块面积标准等指标将建设用地分为 3 个利用强度类型, Palmer-Felgate 等[73]、Jarvie 等[74]将耕地和牧草地分为不同的种植和畜禽养殖强度, Carey 等[75]对建设用地、耕地和牧草地细分成不同强度的土地利用类型。上述研究一定程度考虑了土地利用强度的影响, 分析不同强度的土地利用类型比例与水体营养物参数的关系。

同时, 部分研究中也开始引入与土地利用强度相关的指标, 来讨论其与水体污染的关系, 如化肥施用强度[76]、畜禽养殖密度[77]、畜产品产量[78]、人口密度[79]、非渗透水面比例[80]和城镇化阶段[81]等, 研究结果表明, 刻画土地利用的强度差异有助于提高其对水体富营养化的理解。

2.3　土地利用空间分布对水体营养物的影响

土地利用空间分布格局的差异在早期研究中很少被考虑和量化[82], 实际上, 最终造成水体污染不但与污染物来源相关, 更大程度上取决于水质污染物的空间分布与迁移过程[83], 草地[84]和河岸林[85]对迁移的水质污染物都有截留效应。释放污染和滞留、吸纳污染的土地利用类型的空间组合与分布, 以及污染物迁移路径的长短, 都会影响受纳水体的被污

染强度。O'Neill 等[86]指出土地利用空间上的格局分布对河道生态与环境存在一定的影响; Verburg 等[87]研究表明空间交互作用和邻近特征是土地利用的重要驱动力; Zhang 等[88]认为水体营养物的控制需要合理优化土地利用的空间格局, 在空间规划植被缓冲带以控制水体营养物时, 也需要考虑土地利用的空间分布特征[89-90]。因此, 研究水体营养物与土地利用的关系, 必须考虑土地利用的空间分布与组合。

土地利用单元距离污染受纳水体的远近或所处位置的地形(坡度)对水体中营养物的迁移转化有重要的影响。Ingram 等[91]指出溶解态磷等迁移量随地表坡度及降雨动能的增大而增大, 在坡长为 33~100 m 条件下, 溶解态磷的迁移量随坡长增大而增大; Castillo 等[92]发现地表径流中的硝酸氮和可溶性磷与流域出水口的土地利用存在显著关系; Schilling 等[93]通过研究 1996—1998 年流域地表径流中氮素含量变化与流域汇水区处农田面积比例的变化, 发现两者有比较明显的相关性; Lewis 等[94]指出水中氮浓度的空间异质性受迁移路径的影响; 陈利顶等[95]基于土地利用方式对非点源污染"源-汇"的影响, 提出景观空间负荷对比指数量化土地利用单元相对于流域出口(监测点)的"距离"、"相对高度"和"坡度"等空间特征, 相关研究表明距离、坡度和相对高度等指数对非点源污染有显著的影响[96-98]。

汇入水体的营养物从产生到流至水质监测断面的坡面汇流和河道内的迁移转化等过程中, 污染物是伴随着径流的产生与汇集过程向流域出口断面迁移, 会出现土壤和植被的截留、向地下水的渗透、生化反应、泥沙吸附和河流降解等, 使得污染物不可能全部到达流域出口断面, 即存在流域损失。流域上产生的污染物输出要大于到达流域出口断面的污染输出, 相关研究采用不同的函数来模拟营养物随距离变化发生的损失。线性函数[99]、反距离函数[100]、指数衰减函数[101]或综合上述多种函数[102], 被用以刻画污染物随土地利用类型与污染受纳水体距离变化的衰减规律。对于以营养物输出为主的土地利用类型, 距离用以刻画营养物从上述土地利用输出后的衰减程度, 相反地, 林地等能够减少水体营养物水平的类型, 则是表征对径流中营养物的拦截程度, 距离越近则越能够保护水体[100]。

另一方面, 多数研究中都是独立考虑单一类型的土地利用特征, 土地利用单元与河道及水质监测断面的距离都是被"独立"考虑的。实际上, 在营养物随径流的迁移转化过程中, 不同土地利用之间的相对位置也会对水体营养物浓度产生影响。例如, 如果在耕地产生的营养物随坡面汇流到河道的过程中, 流经林地, 理论上我们定义上述这部分耕地为"被拦截"的耕地, "被拦截"的耕地对水体中营养物的影响会减小, 在这些污染物输出源流经路径上的林地可以发挥更好的拦截和过滤作用。为了刻画上述土地利用的位置邻接关系, Baker 等[68]以耕地、草地和城乡用地为污染物输出源, 林地作为拦截, 提取每一土地利用类型与林地的空间位置邻接关系。此后, 土地利用的位置邻近关系逐渐受到重视并被加以刻画, 用以分析其对水体营养物的影响, 指导土地利用空间格局的优化调整, 以有效控制水体富营养化[68,103]。

此外, 国内外学者引用景观格局指数方法来表征土地利用的空间组合, 探讨土地利用空间格局及其特征与水体营养物的相关关系。从景观尺度, Uuemaa 等[104]研究不同尺度下景观格局指数与流域营养物流失的关系; Alberti 等[105]研究普吉流域城市化进程中土地利用空间格局等指标与流域生物质量指标的关系; Xiao 等[106]研究美国 3 个州矿产废弃物分布流域的景观格局和水质污染的关系。从缀块的水平上, 即不同土地利用单元的水平上, 不同学者也探讨了土地利用空间组合特征与水质污染的关系[107-108]。

2.4 土地利用对水体营养物影响的尺度效应研究

土地利用单元与河道的距离究竟在多大程度上影响着水质污染, 是具有一定的距离阈值[109-110], 还是在流域内[111-113]均产生影响? Sliva 等[111]发现流域尺度内土地利用对水质参数的解释能力优于 100 m 缓冲区的解释能力; 类似还有学者研究指出土地利用对水质的影响是在全流域范围内起作用的[114-115]。也有学者持相反的观点, 如 Storey 等[109]研究表明, 在 600 m 范围内林地能够更为显著地改变径流的物理、化学和生物特征, 恢复因林地转化为牧场而受污染的水质质量; Johnson 等[29]和 Tran 等[110]也发现在河岸带一定距离范围内的景观对于水质的解释能力大于流域尺度。针对水质污染与土地利用的关系, 在全流域和一定范围缓冲区的差异性进行了大量探讨, 但结果迥异, 至今仍无统一定论。纵观这些研究, 除了研究区域自然背景的差异影响结果外[111], 在缓冲区的设置上往往按照经验性的判断, 主观选择一定阈值进行缓冲区设置来完成尺度效应的对比分析[116], 也可能是造成研究结果迥异的原因之一。

这样的争论和不确定性可能归结于不同流域特征的差异性[111]，在以往研究中，有的研究区可能全流域具有类似的土地利用空间特征，即不存在等级结构，那么全流域的土地利用信息都可能对水质污染起作用[111-113]。相反，有的研究区土地利用特征存在明显的空间差异[109-110]，即使具有相同的土地利用数量结构，土地利用在强度和空间分布上都有可能存在显著差异，从而导致两者关系存在尺度效应。随着与污染物受纳水体距离的增加，土地利用本身呈现不同的空间分布特征[117-118]，如耕地和城镇用地多集中分布在河道附近[68]，随着距离的增加，上述两类用地面积迅速减少。同时，营养物却随汇流过程而逐渐衰减[100]，且衰减规律的复杂性导致了土地利用与水体营养物关系随着距离变化的非线性特征[102]。这些因素皆对土地利用与水质参数的定量关系有重要的影响，导致其随着研究尺度的变化而发生变化，因此，进行两者关系的研究需要考虑其多尺度效应和特征阈值[10,119]。已有学者指出，采用可变范围的缓冲区设置[120]或许能够更好地解释两者的关系。

3　问题与展望

3.1　存在问题

1)研究手段各有缺点，难以全面刻画土地利用与水体营养物关系。样地实验作为研究的基础手段，仅能获取局部的点位信息，无法解释流域尺度的特征；统计分析方法能够分析土地利用对水体营养物的影响，但其解释能力不足，得到的两者关系仅为统计特征，而无法充分反映因果关系和相应的机理过程；统计模型简单实用性强，但影响水体营养物的因素区域差异明显，应用统一模型容易忽略个别关键区域参数，导致不确定性的增加；机理模型全面刻画水体营养物相关的整个生态水文过程，但对输入数据和参数校正有严格的要求，现实往往无法实现。

2)水体营养物的生态水文过程与土地利用多组分信息的关联机制不清。水体中营养物从产生、迁移、转化到汇入流域出水口的生态水文过程复杂，目前现有的表征土地利用指标多从不同侧面对上述过程进行刻画，但其指示意义并不明确，得到的关于土地利用信息与水体营养物的关系结果尚需进一步解释。统计分析能够获知土地利用空间异质性对水体营养物的影响程度，但具体的土地利用空间分布特征如何影响最终的水体营养物特征，却难以进行解释。并且，土地利用多组分信息及综合表达目前尚缺乏有效的手段和考虑，也就难以充分揭示土地利用对水体富营养化的影响。

3)土地利用和水体营养物关系尺度效应的不确定性。不同研究中，有的全流域具有相似的土地利用特征，即不存在等级结构，那么全流域的土地利用信息都可能对水体营养物起作用；相反，有的研究区土地利用存在明显空间差异，由于污染物从输出到监测断面存在衰减和损失，使得在一定范围内缓冲区的土地利用单元对水体营养物的影响更大。当前多数研究在缓冲区的设置上基本是凭主观选择一定的阈值，不同的缓冲区设置阈值不尽相同，没有准确量化流域土地利用的特征尺度，可能是造成研究结果迥异的原因之一。

3.2　量化土地利用多组分信息的研究框架

考虑到上述问题，本文认为需要在目前研究方法的基础上，以土地利用多组分信息为研究视角和突破口，刻画与水质污染密切相关的因素，定量探讨和挖掘两者的关系。若流域单元内的土地利用类型数量比例相近，但水体营养物状况显著不同，则需要考虑土地利用其他方面的信息。即便是同一类型的土地利用，单位耕地面积的化肥施用量、单位草地面积的载畜量、单位城乡居住用地面积的人口承载量等的差异，都使得耕地、草地和城乡居住用地利用强度有所不同。坡度的不同，又将导致坡面的产流以及冲刷带走营养物量的差异，地势平坦、坡度小区域营养物的输出功能较小，而随着坡度的增大，坡面冲刷量增大，营养物产出的风险增加。土地利用与河道和监测断面距离的远近将影响营养物输出在坡面汇流及河道汇流的衰减过程，距离越小，土地利用对监测断面水体营养物浓度的影响越大。土地利用位置邻接关系的空间识别反映了特定位置上林地对地表径流营养物的削减作用，植被缓冲带的空间设置将显著影响水体营养物的控制。土地利用各组分信息与地表径流营养物随径流产生、迁移及转化过程密切相关，然而，目前的研究中，相关信息多是被单独或者部分进行量化，进行松散研究。实际上，这些信息隐含在每个土地利用单元上，为了全面刻画土地利用特征，揭示其与水体营养物的关系，需要将多组分信息进行耦合，构建一个有机联系、统一表达的土地利用多组分信息空间。

综合以往的案例研究，本文设计了从现实流域空间到计算机数字空间的土地利用信息表达和量化示意图(图 1)，其中，不仅有土地利用类型差异的信息，还重点考虑了土地利用强度、所处坡度、与河道及监测断面的距离和土地利用位置邻接关系等信

息。应用遥感和 GIS 技术，并结合地面监测、统计数据调查和数理模型模拟等多种手段，可尝试对各土地利用信息进行一一提取，构建土地利用多维信息空间。同时，基于样地定位实验、统计分析和模型模拟等多种方法，提取关键参数，并定量刻画土地利用各信息对水体营养物的影响程度和相互作用。目前常用的输出系数模型和机理模型各有优缺点，因此，以提出的土地利用多维信息空间作为突破口，可对现有经验模型和机理模型进行修正与开发，全面挖掘土地利用与水体营养物的关系。

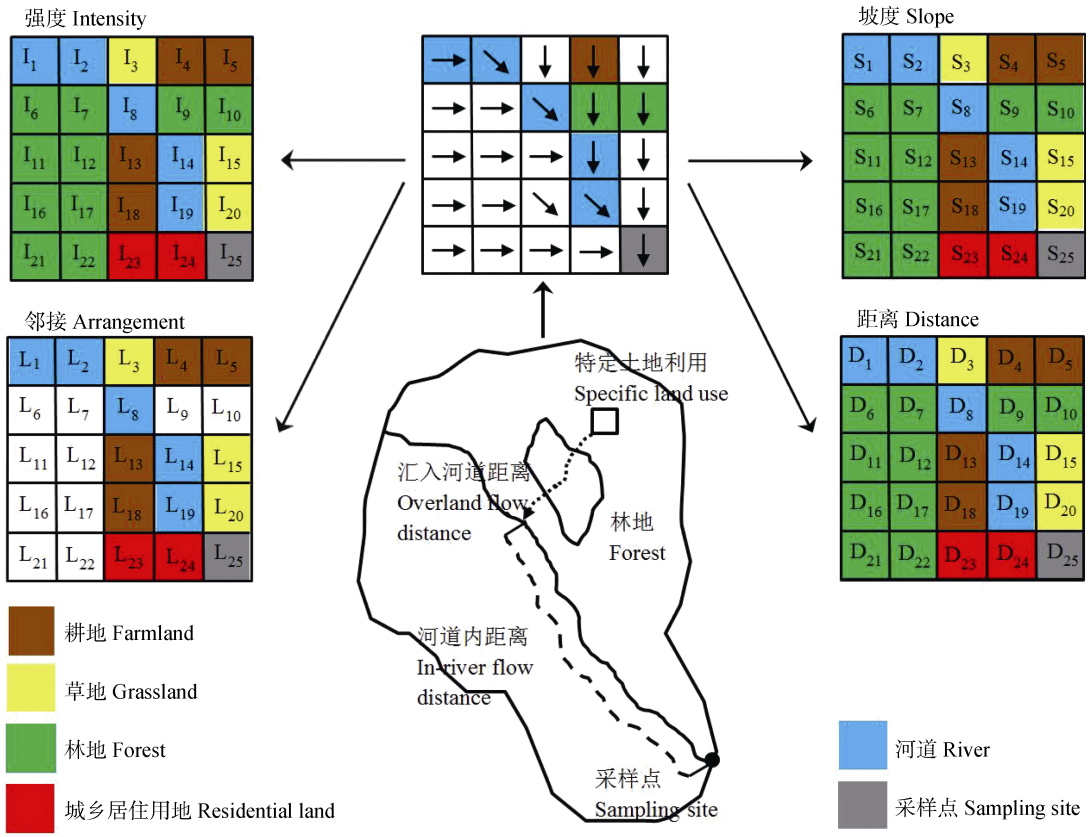

图 1 土地利用多信息空间表达和量化的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of expressing and quantifying the multiple land use information space

3.3 研究展望

1)开发机理过程刻画与经验关系识别相结合的模型。经验模型和机理模型各有优缺点，经验模型方法以土地利用输出系数为基础，但容易忽略重要的生态水文要素；机理模型过程充分考虑了影响水体中营养物的各个因素，但数据量要求大，参数过多又带来更多的不确定性。因此，采用一个折中的办法，即以较小的数据量，基于本文提出的土地利用多组分信息量化框架，刻画影响水体营养物的关键要素，量化污染物的输移、径流过程和生物化学过程的耦合过程，通过数理统计分析，构建两者的关系，以探讨土地利用对水体营养物的影响。

2)综合表达和量化与水体富营养化过程相关联的土地利用多信息指标。依据土地利用多组分信息空间研究框架，以流域水体营养物产生、迁移和转化的生态水文过程为主导，筛选与此密切相关的土地利用结构、强度、所处坡度、与河道及监测断面的距离和土地利用位置邻接关系等信息进行刻画。并且，通过样地实验、数据挖掘、数学模型和参数拟合等技术手段，进行两者内在关联的探讨，明确土地利用指标的指示意义，厘定土地利用不同信息对水体营养物的影响，增加土地利用对水体营养物输出的解释能力。

3)构建土地利用和水体营养物关系的多尺度结构特征。任何流域的土地利用都存在一定的等级结构和空间分布特征，在不同的等级尺度之间，生态学的规律和作用将出现显著的差异。因此，需要通过多尺度的采样和比较，寻找土地利用和水体营养物关系的特征尺度和阈值，构建两者关系的多尺度结构框架，识别不同等级结构内的关键影响因素，并进一步研发尺度转换和综合集成方法。从而，有效指导设置合理的植被缓冲区和河岸带，辅助土地利用管理和优化调控，控制流域水体富营养化。

参考文献 References

[1] SMOL J P. Pollution of Lakes and Rivers: A Paleo Environmental Perspective[M]. Oxford: Blackwell Publishing, 2008

[2] USEPA. National Water Quality Inventory: Report to Congress 2004 Reporting Cycle[M]. Washington: United States Environmental Protection Agency Office of Water, 2009

[3] GRIFFIN R C, BROMLEY D W. Agricultural runoff as a nonpoint externality; A theoretical development[M]//The Theory and Practice of Command and Control in Environmental Policy. London: Routledge, 2018: 43–48

[4] DELKASH M, AL-FARAJ F A M, SCHOLZ M. Impacts of anthropogenic land use changes on nutrient concentrations in surface waterbodies: A review[J]. CLEAN - Soil, Air, Water, 2018, 46(5): 1800051

[5] OELSNER G P, BROOKS P D, HOGAN J F. Nitrogen sources and sinks within the middle Rio *Grande* new Mexico[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2007, 43(4): 850–863

[6] TU J. Combined impact of climate and land use changes on streamflow and water quality in Eastern Massachusetts, USA[J]. Journal of Hydrology, 2009, 379(3/4): 268–283

[7] PARK J, DUAN L, KIM B, et al. Potential effects of climate change and variability on watershed biogeochemical processes and water quality in Northeast Asia[J]. Environment International, 2010, 36(2): 212–225

[8] TONG S T Y, CHEN W L. Modeling the relationship between land use and surface water quality[J]. Journal of Environmental Management, 2002, 66(4): 377–393

[9] MISERENDINO M L, CASAUX R, ARCHANGELSKY M, et al. Assessing land-use effects on water quality, in-stream habitat, riparian ecosystems and biodiversity in Patagonian northwest streams[J]. Science of the Total Environment, 2011, 409(3): 612–624

[10] TROMBONI F, DODDS W K. Relationships between land use and stream nutrient concentrations in a highly urbanized tropical region of Brazil: thresholds and riparian zones[J]. Environmental Management, 2017, 60(1): 30–40

[11] BRETT M T, ARHONDITSIS G B, MUELLER S E, et al. Non-point-source impacts on stream nutrient concentrations along a forest to urban gradient[J]. Environmental Management, 2005, 35(3): 330–342

[12] ONI S K, FUTTER M N, MOLOT L A, et al. Adjacent catchments with similar patterns of land use and climate have markedly different dissolved organic carbon concentration and runoff dynamics[J]. Hydrological Processes, 2014, 28(3): 1436–1449

[13] TANIWAKI R H, CASSIANO C C, FILOSO S, et al. Impacts of converting low-intensity pastureland to high-intensity bioenergy cropland on the water quality of tropical streams in Brazil[J]. Science of the Total Environment, 2017, 584/585: 339–347

[14] BLANKE J H, OLIN S, STÜRCK J, et al. Assessing the impact of changes in land-use intensity and climate on simulated trade-offs between crop yield and nitrogen leaching[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2017, 239: 385–398

[15] KING R S, BAKER M E, WHIGHAM D F, et al. Spatial considerations for linking watershed land cover to ecological indicators in streams[J]. Ecological Applications, 2005, 15(1): 137–153

[16] ZHANG X, WU Q Y, CUI J T, et al. “Source–sink” landscape pattern analysis of nonpoint source pollution using remote sensing techniques[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2018, 15(10): 2253–2268

[17] XIA Y Q, WELLER D E, WILLIAMS M N, et al. Using Bayesian hierarchical models to better understand nitrate sources and sinks in agricultural watersheds[J]. Water Research, 2016, 105: 527–539

[18] LLOYD C E M, FREER J E, JOHNES P J, et al. Using hysteresis analysis of high-resolution water quality monitoring data, including uncertainty, to infer controls on nutrient and sediment transfer in catchments[J]. Science of the Total Environment, 2016, 543: 388–404

[19] UTTORMARK P D, CHAPIN J D, GREEN K M. Estimating Nutrient Loadings of Lakes from Non-point Sources[M]. Madison, USA: Water Resources Center, Wisconsin Univ., 1974

[20] HAITH D A. Land use and water quality in New York rivers[J]. Journal of the Environmental Engineering Division, 1976, 102(1): 1–15

[21] OMERNIK J M, MCDOWELL T R. Nonpoint Source: Stream Nutrient Level Relationships: A Nationwide Study[M]. Corvallis Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency. 1979

[22] 杨金玲, 张甘霖, 张华, 等. 丘陵地区流域土地利用对氮素径流输出的影响[J]. 环境科学, 2003, 24(1): 16–23
YANG J L, ZHANG G L, ZHANG H, et al. The impact of land uses on watershed runoff nitrogen discharge in hilly regions[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2003, 24(1): 16–23

[23] 梁涛, 张秀梅, 章申, 等. 西苕溪流域不同土地类型下氮元素输移过程[J]. 地理学报, 2002, 57(4): 389–396
LIANG T, ZHANG X M, ZHANG S, et al. Nitrogen elements transferring processes and fluxes under different land use in West tiaoxi catchment[J]. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(4): 389–396

[24] 梁涛, 王浩, 章申, 等. 西苕溪流域不同土地类型下磷素随暴雨径流的迁移特征[J]. 环境科学, 2003, 24(2): 35–40
LIANG T, WANG H, ZHANG S, et al. Characteristics of phosphorous losses in surface runoff and sediment under different land use in West tiaoxi catchment[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2003, 24(2): 35–40

[25] 余进祥, 赵小敏, 吕琲, 等. 鄱阳湖流域不同农业利用方式下的氮磷输出特征[J]. 江西农业大学学报, 2010, 32(2): 394–402
YU J X, ZHAO X M, LV B, et al. Transportation characteristics of nitrogen and phosphorus in various land-uses in the Poyang Lake watershed[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2010, 32(2): 394–402

[26] 汪庆兵, 李泽波, 张建锋, 等. 浙北毛竹林地表径流氮磷流失特征[J]. 生态学杂志, 2014, 33(9): 2471–2477
WANG Q B, LI Z B, ZHANG J F, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus loss by surface runoff in Moso bamboo stands in northern Zhejiang Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(9): 2471–2477

[27] 陈成龙, 高明, 木志坚, 等. 三峡库区小流域不同土地利用类型“土壤-水体”氮磷含量特征及其相互关系[J]. 环境科学, 2017, 38(8): 3254–3263
CHEN C L, GAO M, MU Z J, et al. Characteristics and the relationship of nitrogen and phosphorus in soil and water of different land use types of a small watershed in the Three Gorges reservoir area[J]. Environmental Science, 2017, 38(8): 3254–3263

[28] DETENBECK N E, JOHNSTON C A, NIEMI G J. Wetland effects on lake water quality in the Minneapolis/st. Paul metropolitan area[J]. Landscape Ecology, 1993, 8(1): 39–61

[29] JOHNSON L, RICHARDS C, HOST G, et al. Landscape influences on water chemistry in Midwestern stream ecosystems[J]. Freshwater Biology, 1997, 37(1): 193–208

[30] AHEARN D S, SHEIBLEY R W, DAHLGREN R A, et al. Land use and land cover influence on water quality in the last free-flowing river draining the Western Sierra Nevada California[J]. Journal of Hydrology, 2005, 313(3/4): 234–247

[31] BROUSSARD W, TURNER R E. A century of changing land-use and water-quality relationships in the continental US[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2009, 7(6): 302–307

[32] 吴东, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应: 以兰陵溪小流域为例[J]. 环境科学, 2016, 37(8): 2940–2946
WU D, HUANG Z L, XIAO W F, et al. Land use structure change and its control effect of nitrogen output in a small watershed of Three Gorges reservoir area: A case study of Lanlingxi watershed[J]. Environmental Science, 2016, 37(8): 2940–2946

[33] 唐艳凌, 章光新. 流域单元景观格局与农业非点源污染的关系[J]. 生态学杂志, 2009, 28(4): 740–746
TANG Y L, ZHANG G X. Relationships between watershed unit landscape pattern and agricultural non-point source pollution[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(4): 740–746

[34] 李俊然, 陈利顶, 郭旭东, 等. 土地利用结构对非点源污染的影响[J]. 中国环境科学, 2000, 20(6): 506–510
LI J R, CHEN L D, GUO X D, et al. Effect of land use structure on non-point source pollution[J]. China Environmental Science, 2000, 20(6): 506–510

[35] 于兴修, 杨桂山, 梁涛. 西苕溪流域土地利用对氮素径流流失过程的影响[J]. 农业环境保护, 2002, 21(5): 424–427
YU X X, YANG G S, LIANG T. Effects of land use in Xitiaoxi catchment on nitrogen losses from runoff[J]. Agro-Environmental Protection, 2002, 21(5): 424–427

[36] 岳隽, 王仰麟, 李正国, 等. 河流水质时空变化及其受土地利用影响的研究——以深圳市主要河流为例[J]. 水科学进展, 2006, 17(3): 359–364
YUE J, WANG Y L, LI Z G, et al. Spatial-temporal trends of water quality and its influence by land use: A case study of the main rivers in Shenzhen[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(3): 359–364

[37] RECKHOW K H, BEAULAC M N, SIMPSON J T. Modeling Phosphorus Loading and Lake Response under Uncertainty: A Manual and Compilation of Export Coefficients[M]. Washington: US Environmental Protection Agency, 1980

[38] WU L, GAO J E, MA X Y, et al. Application of modified export coefficient method on the load estimation of non-point source nitrogen and phosphorus pollution of soil and water loss in semiarid regions[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(14): 10647–10660

[39] GUNARATNE G L, VOGWILL R I J, HIPSEY M R. Effect of seasonal flushing on nutrient export characteristics of an urbanizing, remote, ungauged coastal catchment[J]. Hydrological Sciences Journal, 2017, 62(5): 800–817

[40] JOHNES P J. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: the export coefficient modelling approach[J]. Journal of Hydrology, 1996, 183(3/4): 323–349

[41] WORRALL F, BURT T P. The impact of land-use change on water quality at the catchment scale: the use of export coefficient and structural models[J]. Journal of Hydrology, 1999, 221(1/2): 75–90

[42] ENDRENY T A, WOOD E F. Watershed weighting of export coefficients to map critical phosphorous loading areas[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2003, 39(1): 165–181

[43] KHADAM I M, KALUARACHCHI J J. Water quality modeling under hydrologic variability and parameter uncertainty using erosion-scaled export coefficients[J]. Journal of Hydrology, 2006, 330(1/2): 354–367

[44] 任玮, 代超, 郭怀成. 基于改进输出系数模型的云南宝象河流域非点源污染负荷估算[J]. 中国环境科学, 2015, 35(8): 2400–2408
PEN W, DAI C, GUO H C. Estimation of pollution load from non-point source in Baoxianghe watershed based, Yunnan Province on improved export coefficient model[J]. China Environmental Science, 2015, 35(8): 2400–2408

[45] 庞树江, 王晓燕. 流域尺度非点源总氮输出系数改进模型的应用[J]. 农业工程学报, 2017, 33(18): 213–223
PANG S J, WANG X Y. Application of modified diffuse total nitrogen export coefficient model at watershed scale[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(18): 213–223

[46] 马蔚纯, 陈立民, 李建忠, 等. 水环境非点源污染数学模型研究进展[J]. 地球科学进展, 2003, 18(3): 358–366
MA W C, CHEN L M, LI J Z, et al. Progress in the research of nonpoint source pollution models of aquatic environment[J]. Advances in Earth Sciences, 2003, 18(3): 358–366

[47] 郑一, 王学军. 非点源污染研究的进展与展望[J]. 水科学进展, 2002, 13(1): 105–110
ZHENG Y, WANG X J. Advances and prospects for nonpoint source pollution studies[J]. Advances in Water Science, 2002, 13(1): 105–110

[48] BEASLEY D B, HUGGINS L F, MONKE E J. ANSWERS: A

model for watershed planning[J]. Transactions of the ASAE, 1980, 23(4): 0938–0944

[49] YOUNG R A, ONSTAD C, BOSCH D, et al. AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds[J]. Journal of soil and water conservation, 1989, 44(2): 168–173

[50] GRUNWALD S, NORTON L D. Calibration and validation of a non-point source pollution model[J]. Agricultural Water Management, 2000, 45(1): 17–39

[51] HAREGEWEYN N, YOHANNES F. Testing and evaluation of the agricultural non-point source pollution model (AGNPS) on Augucho catchment, Western Hararghe, Ethiopia[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2003, 99(1/2/3): 201–212

[52] POLYAKOV V, FARES A, KUBO D, et al. Evaluation of a non-point source pollution model, AnnAGNPS, in a tropical watershed[J]. Environmental Modelling & Software, 2007, 22(11): 1617–1627

[53] PEASE L M, ODUOR P, PADMANABHAN G. Estimating sediment, nitrogen, and phosphorous loads from the pipestem creek watershed, North Dakota, using AnnAGNPS[J]. Computers & Geosciences, 2010, 36(3): 282–291

[54] WILLIAMS J R, JONES C A, KINIRY J R, et al. The EPIC crop growth model[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(2): 0497–0511

[55] ARNOLD J G, ALLEN P M, BERNHARDT G. A comprehensive surface-groundwater flow model[J]. Journal of Hydrology, 1993, 142(1/2/3/4): 47–69

[56] ROMANOWICZ A A, VANCLOOSTER M, ROUNSEVELL M, et al. Sensitivity of the SWAT model to the soil and land use data parametrisation: a case study in the Thyle catchment, Belgium[J]. Ecological Modelling, 2005, 187(1): 27–39

[57] 秦耀民, 胥彦玲, 李怀恩. 基于 SWAT 模型的黑河流域不同土地利用情景的非点源污染研究[J]. 环境科学学报, 2009, 29(2): 440–448
QIN Y M, XU Y L, LI H E. SWAT model of non-point source pollution under different land use scenarios in the Heihe river basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(2): 440–448

[58] 刘博, 徐宗学. 基于 SWAT 模型的北京沙河水库流域非点源污染模拟[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 52–61
LIU B, XU Z X. Simulation of non-point source pollution in the Shahe Reservoir catchment in Beijing by using SWAT model[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5): 52–61

[59] 马放, 姜晓峰, 王立, 等. 基于 SWAT 模型的阿什河流域非点源污染控制措施[J]. 中国环境科学, 2016, 36(2): 610–618
MA F, JIANG X F, WANG L, et al. Non-point source pollution control of Ashihe basin based on SWAT model[J]. China Environmental Science, 2016, 36(2): 610–618

[60] 鲍全盛, 王华东. 我国水环境非点源污染研究与展望[J]. 地理科学, 1996, 16(1): 66–72
BAO Q S, WANG H D. The research and prospect on non-point source pollution of water environment in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 1996, 16(1): 66–72

[61] FRINK C R. Estimating nutrient exports to estuaries[J]. Journal of Environment Quality, 1991, 20(4): 717

[62] ZOBRIST J, REICHERT P. Bayesian estimation of export coefficients from diffuse and point sources in Swiss watersheds[J]. Journal of Hydrology, 2006, 329(1/2): 207–223

[63] HONG B, LIMBURG K E, ERICKSON J D, et al. Connecting the ecological-economic dots in human-dominated watersheds: Models to link socio-economic activities on the landscape to stream ecosystem health[J]. Landscape and Urban Planning, 2009, 91(2): 78–87

[64] PAUL M J, MEYER J L. Streams in the urban landscape[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 2001, 32(1): 333–365

[65] HOODA P S, EDWARDS A C, ANDERSON H A, et al. A review of water quality concerns in livestock farming areas[J]. Science of the Total Environment, 2000, 250(1/2/3): 143–167

[66] JORDAN T E, CORRELL D L, WELLER D E. Effects of agriculture on discharges of nutrients from coastal plain watersheds of Chesapeake bay[J]. Journal of Environmental Quality, 1997, 26(3): 836–848

[67] POSTEL S L, THOMPSON B H. Watershed protection: Capturing the benefits of nature's water supply services[J]. Natural Resources Forum, 2005, 29(2): 98–108

[68] BAKER M E, WELLER D E, JORDAN T E. Improved methods for quantifying potential nutrient interception by riparian buffers[J]. Landscape Ecology, 2006, 21(8): 1327–1345

[69] XU E Q, ZHANG H Q. A model for integrated spatial land use characteristics linking to surface nutrient concentration[J]. International Journal of Digital Earth, 2018, 11(10): 1064–1084

[70] ERB K H. How a socio-ecological metabolism approach can help to advance our understanding of changes in land-use intensity[J]. Ecological Economics, 2012, 76: 8–14

[71] ZHANG T. A spatially explicit model for estimating annual average loads of nonpoint source nutrient at the watershed scale[J]. Environmental Modeling & Assessment, 2010, 15(6): 569–581

[72] SU S L, XIAO R, JIANG Z L, et al. Characterizing landscape pattern and ecosystem service value changes for urbanization impacts at an eco-regional scale[J]. Applied Geography, 2012, 34: 295–305

[73] PALMER-FELGATE E J, JARVIE H P, WITHERS P J A, et al. Stream-bed phosphorus in paired catchments with different agricultural land use intensity[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, 134(1/2): 53–66

[74] JARVIE H P, WITHERS P J A, BOWES M J, et al. Streamwater phosphorus and nitrogen across a gradient in rural–agricultural land use intensity[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010, 135(4): 238–252

[75] CAREY R O, MIGLIACCIO K W, LI Y C, et al. Land use disturbance indicators and water quality variability in the Biscayne bay watershed, Florida[J]. Ecological Indicators, 2011, 11(5): 1093–1104

[76] IITAL A, PACHEL K, LOIGU E, et al. Recent trends in nutrient concentrations in Estonian Rivers as a response to

large-scale changes in land-use intensity and life-styles[J]. J Environ Monit, 2010, 12(1): 178–188

[77] BERKA C, SCHREIER H, HALL K. Linking water quality with agricultural intensification in a rural watershed[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2001, 127(1/2/3/4): 389–401

[78] SMITH A P, WESTERN A W, HANNAH M C. Linking water quality trends with land use intensification in dairy farming catchments[J]. Journal of Hydrology, 2013, 476: 1–12

[79] YIN Z Y, WALCOTT S, KAPLAN B, et al. An analysis of the relationship between spatial patterns of water quality and urban development in Shanghai, China[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2005, 29(2): 197–221

[80] LEE J G, HEANEY J P. Estimation of urban imperviousness and its impacts on storm water systems[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2003, 129(5): 419–426

[81] LIU A, GOONETILLEKE A, EGODAWATTA P. Inadequacy of land use and impervious area fraction for determining urban stormwater quality[J]. Water Resources Management, 2012, 26(8): 2259–2265

[82] JOHNSON L, RICHARDS C, HOST G, et al. Landscape influences on water chemistry in Midwestern stream ecosystems[J]. Freshwater Biology, 1997, 37(1): 193–208

[83] 陈利顶, 傅伯杰, 张淑荣, 等. 异质景观中非点源污染动态变化比较研究[J]. 生态学报, 2002, 22(6): 808–816
CHEN L D, FU B J, ZHANG S R, et al. Comparative study on the dynamics of non-point source pollution in a heterogeneous landscape[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(6): 808–816

[84] PEARCE R A, TRLICA M J, LEININGER W C, et al. Efficiency of grass buffer strips and vegetation height on sediment filtration in laboratory rainfall simulations[J]. Journal of Environmental Quality, 1997, 26(1): 139–144

[85] PETERJOHN W T, CORRELL D L. Nutrient dynamics in an agricultural watershed: observations on the role of a riparian forest[J]. Ecology, 1984, 65(5): 1466–1475

[86] O'NEILL R V, HUNSAKER C T, JONES K B, et al. Monitoring environmental quality at the landscape scale[J]. BioScience, 1997, 47(8): 513–519

[87] VERBURG P H, SOEPBOER W, VELDKAMP A, et al. Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model[J]. Environmental Management, 2002, 30(3): 391–405

[88] ZHANG P, LIU Y H, PAN Y, et al. Land use pattern optimization based on CLUE-S and SWAT models for agricultural non-point source pollution control[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2013, 58(3/4): 588–595

[89] UDAWATTA R P, GARRETT H E, KALLENBACH R. Agroforestry buffers for nonpoint source pollution reductions from agricultural watersheds[J]. Journal of Environmental Quality, 2011, 40(3): 800–806

[90] QI H H, ALTINAKAR M S. Vegetation buffer strips design using an optimization approach for non-point source pollutant control of an agricultural watershed[J]. Water Resources Management, 2011, 25(2): 565–578

[91] INGRAM J J,WOOLHISER D A. Chemical transfer into overland flow[C]. Symposium on Watershed Management 1980, ASCE. New York: American Society of Civil Engineers, 1980: 40–53

[92] CASTILLO M M, ALLAN J D, BRUNZELL S. Nutrient concentrations and discharges in a Midwestern agricultural catchment[J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 29(4): 1142–1151

[93] SCHILLING K E, LIBRA R D. The relationship of nitrate concentrations in streams to row crop land use in Iowa[J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 29(6): 1846–1851

[94] LEWIS D B, GRIMM N B, HARMS T K, et al. Subsystems, flowpaths, and the spatial variability of nitrogen in a fluvial ecosystem[J]. Landscape Ecology, 2007, 22(6): 911–924

[95] 陈利顶, 傅伯杰, 徐建英, 等. 基于"源–汇"生态过程的景观格局识别方法——景观空间负荷对比指数[J]. 生态学报, 2003, 23(11): 2406–2413
CHEN L D, FU B J, XU J Y, et al. Location-weighted landscape contrast index: a scale independent approach for landscape pattern evaluation based on "source-sink" ecological processes[J]. Acta Ecologica Sinica, 23(11): 2406–2413

[96] 索安宁, 王天明, 王辉, 等. 基于格局-过程理论的非点源污染实证研究: 以黄土丘陵沟壑区水土流失为例[J]. 环境科学, 2006, 27(12): 2415–2420
SUO A N, WANG T M, WANG H, et al. Empirical study on non-point sources pollution based on landscape pattern & ecological processes theory: A case of soil water loss on the loess plateau in China[J]. Environmental Science, 2006, 27(12): 2415–2420

[97] 岳隽, 王仰麟, 李贵才, 等. 不同尺度景观空间分异特征对水体质量的影响——以深圳市西丽水库流域为例[J]. 生态学报, 2007, 27(12): 5271–5281
YUE J, WANG Y L, LI G C, et al. The influence of landscape spatial difference on water quality at differing scales: A case study of Xili reservoir watershed in Shenzhen City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 5271–5281

[98] 刘芳, 沈珍瑶, 刘瑞民. 基于"源–汇"生态过程的长江上游农业非点源污染[J]. 生态学报, 2009, 29(6): 3271–3277
LIU F, SHEN Z Y, LIU R M. The agricultural non-point sources pollution in the upper reaches of the Yangtze River based on source-sink ecological process[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 3271–3277

[99] PETERSON E E, SHELDON F, DARNELL R, et al. A comparison of spatially explicit landscape representation methods and their relationship to stream condition[J]. Freshwater Biology, 2011, 56(3): 590–610

[100] GOETZ S, FISKE G. Linking the diversity and abundance of stream biota to landscapes in the mid-Atlantic USA[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(11): 4075–4085

[101] JOHNSON T E, MCNAIR J N, SRIVASTAVA P, et al. Stream ecosystem responses to spatially variable land cover: an empirically based model for developing riparian restoration strategies[J]. Freshwater Biology, 2007, 52(4): 680–695

[102] WALSH C J, WEBB J A. Spatial weighting of land use and temporal weighting of antecedent discharge improves prediction of stream condition[J]. Landscape Ecology, 2014, 29(7): 1171–1185

[103] WELLER D E, BAKER M E. Cropland riparian buffers throughout Chesapeake bay watershed: spatial patterns and effects on nitrate loads delivered to streams[J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2014, 50(3): 696–712

[104] UUEMAA E, ROOSAARE J, MANDER Ü. Scale dependence of landscape metrics and their indicatory value for nutrient and organic matter losses from catchments[J]. Ecological Indicators, 2005, 5(4): 350–369

[105] ALBERTI M, BOOTH D, HILL K, et al. The impact of urban patterns on aquatic ecosystems: An empirical analysis in Puget lowland sub-basins[J]. Landscape and Urban Planning, 2007, 80(4): 345–361

[106] XIAO H G, JI W. Relating landscape characteristics to non-point source pollution in mine waste-located watersheds using geospatial techniques[J]. Journal of Environmental Management, 2007, 82(1): 111–119

[107] ROBERTS A D, PRINCE S D. Effects of urban and non-urban land cover on nitrogen and phosphorus runoff to Chesapeake Bay[J]. Ecological Indicators, 2010, 10(2): 459–474

[108] LEE S W, HWANG S J, LEE S B, et al. Landscape ecological approach to the relationships of land use patterns in watersheds to water quality characteristics[J]. Landscape and Urban Planning, 2009, 92(2): 80–89

[109] STOREY R G, COWLEY D R. Recovery of three New Zealand rural streams as they pass through native forest remnants[J]. Hydrobiologia, 1997, 353(1): 63–76

[110] TRAN C P, BODE R W, SMITH A J, et al. Land-use proximity as a basis for assessing stream water quality in New York State (USA)[J]. Ecological Indicators, 2010, 10(3): 727–733

[111] SLIVA L, DUDLEY WILLIAMS D. Buffer zone versus whole catchment approaches to studying land use impact on river water quality[J]. Water Research, 2001, 35(14): 3462–3472

[112] RIVA-MURRAY K, BODE R W, PHILLIPS P J, et al. Impact source determination with biomonitoring data in New York State: concordance with environmental data[J]. Northeastern Naturalist, 2002, 9(2): 127–162

[113] NIELSEN A, TROLLE D, SØNDERGAARD M, et al. Watershed land use effects on lake water quality in Denmark[J]. Ecological Applications, 2012, 22(4): 1187–1200

[114] DOW C L, ARSCOTT D B, NEWBOLD J D. Relating major ions and nutrients to watershed conditions across a mixed-use, water-supply watershed[J]. Journal of the North American Benthological Society, 2006, 25(4): 887–911

[115] WOODCOCK T, MIHUC T, ROMANOWICZ E, et al. Land-use effects on catchment- and patch-scale habitat and macroinvertebrate responses in the Adirondack uplands[J]. Landscape Influences on Stream Habitats and Biological Assemblages, 2004, 48: 395–411

[116] PARK S R, LEE H J, LEE S W, et al. Relationships between land use and multi-dimensional characteristics of streams and rivers at two different scales[J]. Annales De Limnologie - International Journal of Limnology, 2011, 47: S107–S116

[117] WOLF K, CYRYS J, HARCINÍKOVÁ T, et al. Land use regression modeling of ultrafine particles, ozone, nitrogen oxides and markers of particulate matter pollution in Augsburg, Germany[J]. Science of the Total Environment, 2017, 579: 1531–1540

[118] BU H M, MENG W, ZHANG Y, et al. Relationships between land use patterns and water quality in the Taizi River basin, China[J]. Ecological Indicators, 2014, 41: 187–197

[119] ZHANG C F, LI S, QI J Y, et al. Assessing impacts of riparian buffer zones on sediment and nutrient loadings into streams at watershed scale using an integrated REMM-SWAT model[J]. Hydrological Processes, 2017, 31(4): 916–924

[120] GUO Q H, MA K M, YANG L, et al. Testing a dynamic complex hypothesis in the analysis of land use impact on lake water quality[J]. Water resources management, 2010, 24(7): 1313–1332