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

伊洛河上游流域退耕还林/还草对蓝水绿水分配的影响

连勰, 黄峰

引用本文:
连勰, 黄峰. 伊洛河上游流域退耕还林/还草对蓝水绿水分配的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(9): 1409–1420.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190032

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于生态水文理念的流域水资源规划研究*--以子牙河为例

Water resources planning driven by eco-hydrology theorem:A case study of Ziya River basin

中国生态农业学报. 2016, 24(12): 1722–1731 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160548

农产品水足迹评价研究进展

A review of water footprint assessment for agricultural products

中国生态农业学报. 2017, 25(7): 1071–1080 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170027

基于作物生产水足迹的陕西省水资源压力评价

Assessment of water stress in Shaanxi Province based on crop water footprint

中国生态农业学报. 2015(5): 650–658 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.141312

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

土地利用对水体营养物影响的研究进展

Research progress in the impact of land use on water nutrients

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(12): 1880–1891 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190110

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190032

连勰, 黄峰. 伊洛河上游流域退耕还林/还草对蓝水绿水分配的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(9): 1409−1420
LIAN X, HUANG F. Green/blue water allocation as affected by Grain-for-Green practices in the upper reaches of the Yiluo River[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(9): 1409−1420

伊洛河上游流域退耕还林/还草对蓝水绿水分配的影响*

连 勰, 黄 峰**

(中国农业大学资源与环境学院/农业部华北耕地保育重点实验室 北京 100193)

摘 要: 土地利用变化对区域水循环具有重要影响, 土地利用决策就是水资源决策, 这一命题已经被诸多研究证实并被研究者和决策者所认识。本文以黄河流域中游的伊洛河上游流域为研究区域, 应用分布式流域农业生态水文模型 SWAT(Soil and Water Assessment Tool), 在我国退耕还林还草的生态恢复和重建的重大背景下, 分别设置了 6 种不同的土地利用变化情景, 基于蓝水和绿水的视角, 研究土地利用/覆被对流域水循环的影响。本文对 SWAT 模型输出的月径流结果进行了率定和验证, 证明该模型对研究流域水文循环的模拟达到了可接受水平的准确性与合理性。采用单因素方差分析和多重比较, 分析基于不同水文年型下土地利用变化对各水文要素变化的影响。结果表明: 1)2010—2015 年多年平均降水资源总量为 34.94 亿 m^3, 多年平均蓝水绿水资源总量为 34.09 亿 m^3, 蓝水资源量占多年蓝水绿水资源总量的 33.73%, 绿水资源量占多年蓝水绿水资源总量的 66.27%。2)不同情景退耕还林或还草, 蓝水资源量均减少, 绿水流均增加, 绿水库均减少。在丰水年和平水年, 退耕还林还草对蓝水资源量中地表径流分量影响较明显。该结论对于加深认识伊洛河上游流域土地利用/覆被和水资源的相互关系具有一定意义, 为该区域高效合理利用水土资源提供了科学依据。

关键词: 蓝水; 绿水; 土地利用; 退耕还林还草; 伊洛河上游流域; SWAT

中图分类号: X37

文章编号: 2096-6237(2019)09-1409-12 **开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

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

LIAN Xie, HUANG Feng**

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University / Key Laboratory of Arable Land Conservation (North China), Ministry of Agriculture, Beijing 100193, China)

Abstract: Land use/cover change (LUCC) is of significant impact on regional water cycle. Land use decision-making is water resources decision-making, which has been confirmed by many studies and recognized by researchers and decision makers. Taking the upper reaches of Yiluo River in the middle reaches of the Yellow River Basin as the case study area, this paper applied the distributed watershed agricultural eco-hydrological model SWAT (Soil and Water Assessment Tool). According to the important background of ecological restoration and reconstruction of Grain-for-Green in China, six different land use change scenarios were set up to study the impact of land use/cover change on watershed water cycle from the perspective of blue/green water. This paper calibrated and validated the monthly runoff output of SWAT model, and proved that the model

* 国家重点研发计划项目(2016YFD0300801013)资助
** 通信作者: 黄峰, 主要从事流域生态水文建模与全国/区域生态与粮食安全用水权衡研究。E-mail: fhuang@cau.edu.cn
连勰, 主要从事流域水文-作物建模和水资源配置研究。E-mail: lianxie@cau.edu.cn
收稿日期: 2019-01-09 接受日期: 2019-03-20

* This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFD0300801013).
** Corresponding author, E-mail: fhuang@cau.edu.cn
Received Jan. 9, 2019; accepted Mar. 20, 2019

achieved acceptable accuracy and rationality in simulating the hydrological cycle of the river basin. One-way ANOVA and multiple comparisons were used to analyze the effects of land use change on the changes of various hydrological factors based on different hydrological years. The results showed that: 1) From 2010 to 2015, the annual average precipitation resources was 3.494 billion m^3, and the annual average of total blue water and green water resources was 3.409 billion m^3. Blue water resources accounted for 33.73%, and green water resources accounted for 66.27% of the total blue water and green water resources in multi-year average. 2) Under different scenarios of Grain-for-Green, the amount of blue water resources decreased, the green water flow increased, and the green reservoirs decreased. In the year of the wet year and normal year, the impact of land use/cover change on the surface runoff component of the blue water resources was more obvious. This conclusion has certain significance for deepening the understanding of the relationship between land use/cover and water resources in the upper reaches of the Yiluo River, and provides a scientific basis for efficient and rational utilization of water and soil resources in the region.

Keywords: Blue water; Green water; Land use; Grain-for-Green; Upper-stream basin of Yiluo River; SWAT

水资源是一个国家基础性的自然和经济资源, 应用于农业、工业、生态、水利发电等国家经济各部门, 以及城乡人口直接和间接利用。随着社会经济快速发展, 水资源供需矛盾日益加剧, 水资源问题已经成为制约我国可持续发展的主要因素[1]。对水资源进行精准的量化管理, 就必须从流域的视角考虑水文循环的各个要素。蓝水和绿水是近年来国际水资源管理研究的新视角, 从生态水文的视角统一了流域水文循环的各项。“蓝水”是指在河流、地下含水层、水库和湖泊中储存的水分, 即我们所认识的传统意义上的“水资源”; “绿水”则是由降水渗入土壤而产生、可以被植物吸收利用的水分, 由于其支撑了陆地生态系统的绿色植物的生长, 所以称为“绿水”[2-3]。绿水又可进一步分为“绿水流”和“绿水库”, 绿水流是指实际蒸散量, 绿水库是土壤含水量[4]。然而, 传统水资源评价只考虑了水文循环中的蓝水部分, 而忽略了绿水部分[5]。通过草原, 森林和农田的蒸散作用, 大气中的绿水流占全球降水量的 65%, 而传统的蓝水资源仅占全球降水量的 35%[6-7]。因此, 对水资源的管理与合理利用就必须同时考虑蓝水和绿水。

每一个土地利用决策都是水资源利用的决策, 这一观点被越来越多的研究所证实[8-9]。土地利用变化影响水文过程和生态服务[10-11]。水资源合理利用, 就必须因地制宜合理利用土地资源。近年来, 由于不合理开发利用土地资源, 坡耕地种植作物, 围湖造田等问题, 造成水土流失[12-13]、土壤退化[14]、土壤有机质含量低[15]等问题, 改变了流域水文循环, 破坏了流域生态系统平衡, 对社会经济可持续发展带来了不利的影响。为遏止水土流失和土壤退化等问题, 我国于 2002 年全面启动退耕还林工程。2014 年党中央、国务院做出实施新一轮退耕还林还草的重大决策, 对坡耕地种植作物情况实施更严格的管理[16]。伊洛河上游流域是黄河流域重要的支流, 坡耕地占耕地总面积的 49.61%, 陡坡耕种, 造成严重水土流失和土壤侵蚀, 粮食产量低, 生态环境恶化, 严重制约区域经济社会可持续发展。因此, 为了有效管理水资源, 就必须了解水循环和土地管理之间的关系, 实现土地资源和水资源的合理利用。

目前, 定量分析土地利用变化对流域水文过程影响的方法主要包括: 试验流域法、水文特征参数时间序列法和流域水文模型模拟法[17]。前两种方法在研究流域水文过程方面具有传统优势, 但也存在着一定的局限性[18]。因此, 本文选择流域水文模型法。SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型是应用最广泛的生态水文模型之一, 适用于不同土地利用/覆被类型、土壤类型、气候条件和管理措施下的复杂流域中[19]。模型具有很强的物理机制, 能够利用 GIS 和 RS 提供的空间数据信息模拟水文循环的时空变化过程, 输入数据相对较少, 且容易获得, 计算效率高, 不用投入过多的财力和时间, 可对流域进行长期模拟[20-21]。针对 SWAT 模型土地利用变化应用问题, 国内外许多学者进行了研究。Gebremicael 等[22]研究埃塞俄比亚高原土地利用变化对径流和沉积物通量影响, 发现雨季流量和沉积物通量增加, 干旱季节减少; 黎云云等[23]分析渭河流域不同土地利用变化下径流的影响, 表明近 20 年土地利用变化对径流影响小于 15%; 耿润哲等[24]研究密云水库土地利用变化对面源污染的影响, 发现耕地、林地面积比例等因素是影响研究区非点源污染负荷输出的主要因子。SWAT 模型模拟蓝水和绿水变化过程近年来得到了广泛运用, 包括中国黄河[25]、美国萨凡纳河流域[26]、伊朗[27]、非洲[5]等国家和地区。

综上所述, 国内外学者运用 SWAT 模型对蓝水绿水时空变化影响及土地利用变化分析具有一定的优势, 为本文进一步分析奠定了基础。但现有研究

同时分析土地利用变化对蓝水绿水资源变化情况并不多见, 包括有斯洛文尼亚的地中海沿岸流域[28]、晋江西溪流域[29]、湟水流域[30]等。本文与其他类似研究的不同之处在于: 1)分析了土地利用变化对蓝水绿水分配的影响, 且具体到蓝水中地表径流、壤中流、回归流的变化, 较之前的研究更为细致。2)按照不同的水文年型来考虑水文要素的变化情况。3)应用统计方法中单因素方差分析和多重比较分析了各个水文要素变化趋势显著性。鉴于此, 本文以伊洛河上游流域为例, 运用 SWAT 模型, 根据我国新一轮退耕还林还草的生态恢复和重建的重大背景, 设置了 6 种土地利用情景, 包括: 对大于 25°以上坡耕地退耕还林、大于 25°以上坡耕地退耕还草、大于 15°以上坡耕地退耕还林、大于 15°以上坡耕地退耕还草、全部耕地退耕还林、全部耕地退耕还草, 分析了土地利用变化对蓝水绿水资源变化影响, 并应用单因素方差分析和多重比较, 根据不同的水文年型比较不同情景下各个水文要素变化趋势显著性。研究成果对于伊洛河上游流域生态环境的改善以及蓝水绿水资源分配都有着极其重要的作用, 同时为流域水资源和土地资源合理利用提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

伊洛河流域是黄河流域重要的支流, 其中伊洛河上游流域位于 109.7°~111.3°E, 33.7°~34.4°N。主要水系是洛河水系, 其中洛河发源于陕西省蓝田县灞源乡, 全长 410 km, 自西向东主要流经洛南县、卢氏县等县市, 流域面积 5 137.07 km^2(图 1)。处于亚热带与暖温带的过渡带, 属于大陆性季风气候区, 冬季寒冷少雨, 夏季炎热多雨, 多年平均气温 12~14 ℃, 年≥10 ℃积温 4 064.1 ℃, 多年平均降水量 600~900 mm。伊洛河上游流域的耕地大部分处于雨养农业区, 分布于河谷川地、盆地及冲积平原。土地利用/覆被类型分为 6 大类, 包括: 耕地、林地、草地、水域、城镇用地和未利用地。土壤类型包括 4 大类: 雏形土、淋溶土、冲积土、岩性土(图 2)。

1.2　数据来源

本文收集数据包括: 数字高程模型、数字水系图、土地利用/覆被数据、土壤空间和属性数据、气象数据和水文数据等, 数据简述及来源如表 1 所示。

1.3　SWAT 模型

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型是由美国农业部(USDA)农业研究中心 Jeff Arnold 博士开发的流域尺度分布式水文模型[31], 模型开发的最初目的是在不同土壤类型、土地利用和管理条件特征的大尺度流域内, 预测土地管理措施长期对产水、产沙及农业化学污染物负荷等影响[21]。水文循环过程包括: 降水、入渗、蒸发、地表径流、壤中流等[32]。模型可以模拟蓝水和绿水循环过程及不同土地利用变化情况。

根据 SWAT 模型中水量平衡公式, 其中每个分量可以与蓝水绿水资源量相关联。

$$\Delta SW = PRECIP - SURQ - ET - PERC - LATQ \quad (1)$$

$$WYLD = SURQ + LATQ + GWQ - TLOSS \quad (2)$$

式中: ΔSW 为一段时间内土壤中的含水量变化; PRECIP 为时间步长内的总降水量; SURQ 为时间步长内汇入河道的地表径流; ET 代表时间步长内实际蒸散量; PERC 为时间步长内根区渗漏量; LATQ 为时间步长内汇入河道的壤中流; WYLD 为时间步长内从水文响应单元(HRU)至子流域进入河道的总水量; GWQ 为时间步长内河道的地下水; TLOSS 为传输过程中的损失量。以上变量所有单位均为 mm。其中, 蓝水包括产水量和深层含水层补给量, 本文的蓝水资源量主要考虑产水量; 绿水资源量包括了绿水流和绿水库, 绿水流即为实际蒸散量, 绿水库则为土壤含水量[5,27]。

1.4　土地利用变化情景设置

党中央、国务院高度重视林业生态保护和建设, 2014 年启动了新一轮退耕还林还草工程, 严格限定范围在 25°以上非基本农田坡耕地、严重沙化耕地和重要水源地 15°~25°坡耕地[33]。本研究区内大于 25°以上坡耕地面积为 264.23 km^2, 占总耕地面积 20.31%, 15°~25°坡耕地 381.14 km^2, 占总耕地面积 29.30%, 即研究区内坡耕地占耕地总面积的 49.61%。坡耕地水土流失严重, 造成严重的土壤侵蚀, 为了改善生态环境, 实现社会经济可持续发展。本文以新一轮退耕还林还草工程为视角, 初始土地利用类型为对照组, 分别设置了 6 种情景(表 2)。对 SWAT 模型模拟的地表径流、壤中流、回归流、渗漏量、土壤含水量、实际蒸散量、产水量 7 个水文要素, 运用单因素方差分析和多重比较[34], 按照不同水文年型, 比较不同情景下各个水文要素变化趋势的显著性。

2　结果与分析

2.1　模型率定及验证

本文采用 SUFI-2 方法[35-36]对模型进行不确定

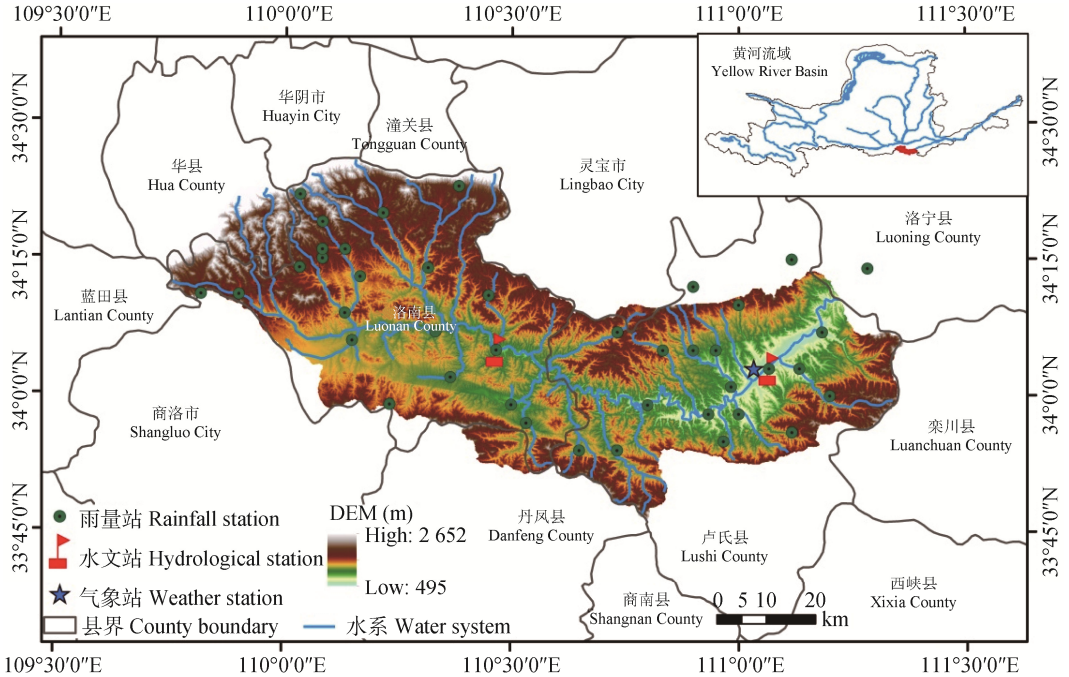

图 1 伊洛河上游流域地理位置及水文气象测站分布

Fig. 1 Geographical location and hydrometeorological station distribution in the upper reaches of the Yiluo River

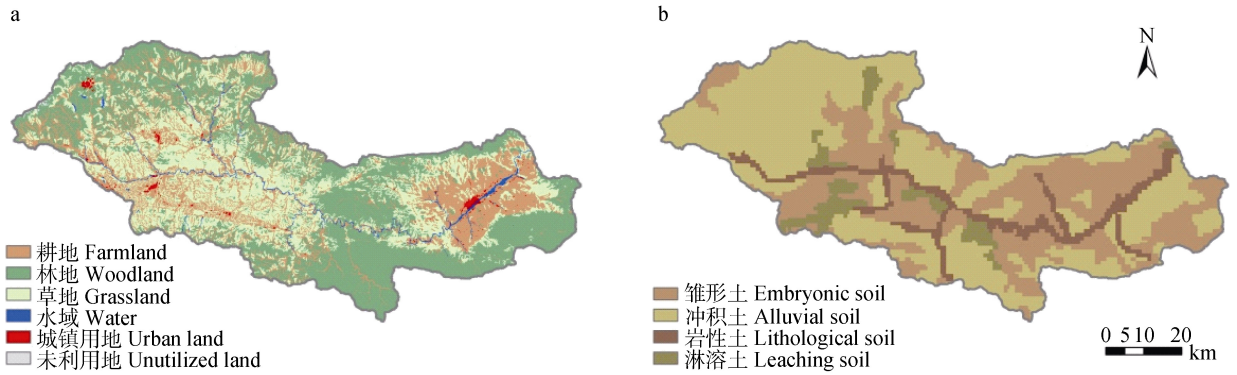

图 2 伊洛河上游流域土地利用/覆被图**(a)**和土壤图**(b)**

Fig. 2 Land use/coverage map (a) and soil types map (b) of the upper reaches of the Yiluo River

分析、敏感性分析、率定和验证。共选择与径流有关的 26 个参数，用 *t*-stat 和 *P*-value 值来衡量参数敏感性。其中 *t*-stat 代表敏感性程度，绝对值越大越敏感；*P*-value 代表参数敏感性的显著性，越接近于 0 越显著[37]。如表 3 所示：选择从大到小排列的平均坡长、融雪基温、最大冠层截留量、土壤饱和导水率、基流 alpha 因子、土壤蒸发补偿系数、土壤表层到底层的深度、主河道河床曼宁系数、湿润土壤反照率、浅层含水层“再蒸发”或渗透到深层含水层的阈值深排名前十的参数进行率定和验证。

依据 SWAT-CUP 工具中的 SUFI-2 算法对 SWAT 模型输出结果进行不确定分析、率定及验证。SUFI-2 算法中用 *P*-factor 和 *R*-factor 对模型不确定性进行定量评估。*P*-factor 表示实测数据落入模拟结果的置信区间 95PPU(95% prediction uncertainty)，*R*-factor 是用 95PPU 带的平均厚度除以监测数据标准偏差。理论上，*P*-factor 值在 0 和 100%之间，而 *R*-factor 值在 0 和无穷大之间，*P*-factor 越接近 1 和 *R*-factor 越接近 0，表明模拟的效果越好[38-39]。用 R^2 和 Nash-Suttcliffe 效率系数(*E*ns)来综合评价 SWAT 模型的模拟效果。R^2 表示模拟值与实测值变化趋势的一致性，值越接近于 1，说明模拟值与实测值趋势越吻合。*E*ns 效率系数表示实测值与模拟值的偏离程度，值越接近于 1，表明模拟值越接近实测值[40]。以收集到的灵口、卢氏两个水文站 2009—2015 年月平均流量数据对模型进行率定和验证，其中 2009 年为预热期，2010—2012 年为率定期，2013—2015 年为验

表 1　伊洛河上游流域基础数据内容及来源
Table 1　Contents and sources of basic data in the upper reaches of the Yiluo River

数据类型 Type of data	数据描述 Data description	数据来源 Data sources
数字高程模型 Digital elevation model	分辨率为 30 m×30 m The resolution is 30 m × 30 m.	地理空间数据云 Geospatial Data Cloud
数字水系图 Digital water system	1∶100 万数字水系图 1∶1 million digital water system diagram	全国地理信息资源目录服务系统 National Catalogue Service for Geographic Information
土地利用/覆被数据 Land use/coverage data	2015 年土地利用/覆被数据(30 m × 30 m) Land use/coverage data in 2015 (30 m × 30 m)	中国科学院资源环境科学数据中心 Resource and Environmental Science Data Center of Chinese Academy of Sciences
土壤空间数据 Soil spatial data	0~30 cm、30~100 cm 土壤机械组成(1 km × 1 km) 0–30 cm、30–100 cm soil mechanical composition (1 km × 1 km)	中国科学院资源环境科学数据中心 Resource and Environmental Science Data Center of Chinese Academy of Sciences
土壤属性数据 Soil attribute data	利用 SPAW 软件和 EXCEL 对土壤组成、容重等进行计算 Calculation of soil composition, bulk density, etc. using SPAW software and EXCEL	中国科学院资源环境科学数据中心 Resource and Environmental Science Data Center of Chinese Academy of Sciences
气象数据 Meteorological data	2009—2015 年 41 个雨量站 Fourth-one rain stations from 2009 to 2015	黄河流域水文年鉴 Hydrological data of Yellow River Basin
	1980—2016 年国家卢氏气象站日值气象数据 Daily value weather data of the National Lushi Weather Station from 1980 to 2016	中国气象数据网 China Meteorological Data Network
水文数据 Hydrological data	2009—2015 年灵口和卢氏水文站月平均流量 Monthly average flow of Lingkou and Lushi Hydrological Stations from 2009 to 2015	黄河流域水文年鉴 Hydrological data of Yellow River Basin

表 2　伊洛河上游流域退耕还林/还草情景设置
Table 2　Scenarios of Grain-for-Green in the upper reaches of the Yiluo River

情景模拟 Scenario simulation	描述 Description
情景 1 Scenario 1	大于 25°以上坡耕地进行退耕还林 Sloping farmland above 25° returned to forest
情景 2 Scenario 2	大于 15°以上坡耕地进行退耕还林 Sloping farmland above 15° returned to forest
情景 3 Scenario 3	全部耕地退耕还林 All farmland returned to forests
情景 4 Scenario 4	大于 25°以上坡耕地退耕还草 Sloping farmland above 25° returned to grassland
情景 5 Scenario 5	大于 15°以上坡耕地退耕还草 Sloping farmland above 15° returned to grassland
情景 6 Scenario 6	全部耕地退耕还草 All farmland returned to grassland

证期。

结果显示(图 3 和图 4): 灵口和卢氏水文站模拟值与实测值月径流结果拟合效果较好。根据模型模拟结果评价参数的 *P*-factor 大于 0.6、*R*-factor 小于 1.5、R^2 大于 0.6 和 *E*ns 效率系数大于 0.5[41], 两站的模拟结果基本满足精度要求。灵口站和卢氏站率定和验证结果表明, 各水文站率定期 R^2 在 0.9 以上, *E*ns 效率系数在 0.75 以上, 验证期 R^2 和 *E*ns 效率系数有所减小, 但 R^2 均在 0.7 以上, *E*ns 效率系数均在 0.6 以上, 满足模拟精度要求, 模拟效果较好。对结果进行不确定分析, 灵口和卢氏水文站 *P*-factor 除灵口站率定时期小于 0.6 外, 其余均大于 0.6, *R*-factor 都小于 1, 说明水文站模拟结果大部分在 2.5%~97.5%置信区间之内, 不确定程度小。

2.2　水文循环分析

根据模型运行结果(表 4), 多年平均降水资源总量为 34.94 亿 m^3, 多年平均蓝水绿水资源总量为 34.09 亿 m^3, 产水量(蓝水资源量)多年平均为 11.50 亿 m^3, 占多年蓝水绿水资源总量 33.73%。其中的地表径流分量 4.45 亿 m^3, 占产水量的 38.70%; 壤中流分量 5.45 亿 m^3, 占产水量的 47.39%; 回归流分量 1.60 亿 m^3, 占产水量的 13.91%; 渗漏量为 2.46 亿 m^3。绿水资源量占多年蓝水绿水资源总量 66.27%, 土壤含水量(绿水库)变化量为 0.16 亿 m^3, 实际蒸散量(绿水流)多年平均为 22.75 亿 m^3。

计算得出各项水文要素时空分布(图 5), 伊洛河上游多年平均降水量为 553~835 mm; 各子流域空间上分布不均匀, 上游子流域平均最大降水量达 722~835 mm, 中下游子流域最小降水量达 553~604 mm。整体上看, 上游降水大于中下游。产水量的变化大致是上游>下游>中游, 多年平均产水量为 128~339 mm。其中地表径流分量多年平均为 23~220 mm, 壤中流分量多年平均为 4~193 mm, 回归流分量多年平均为 3~97 mm。渗漏量多年平均为 11~115 mm。实际蒸散量多年平均为 380~789 mm, 变化幅度达 409 mm, 空间变异较大, 变化幅度大致为上游>中游>下游。

表 3 SWAT 模型主要参数取值

Table 3 Main parameters of the SWAT model

参数名称 Parameter name	参数含义 Parameter meaning	初始范围 Initial range		参数调整值 Parameter adjustment value
		最小值 Minimum value	最大值 Maximum value	
v__SLSUBBSN.hru	平均坡长 Average slope length (m)	10	150	13.15
v__SMTMP.bsn	融雪基温 Snow melt base temperature (℃)	−5	5	−1.43
v__CANMX.hru	最大冠层截留量 Maximum canopy storage (mm)	0	100	59.75
r__SOL_K.sol	土壤饱和导水率 Soil saturated hydraulic conductivity ($mm \cdot h^{-1}$)	−0.5	0.5	−0.03
v__ALPHA_BF.gw	基流 alpha 因子 Base flow alpha factor (d)	0	1.0	0.95
v__ESCO.hru	土壤蒸发补偿系数 Soil evaporation compensation factor	0.01	1.0	0.18
r__SOL_Z.sol	土壤表层到底层的深度 Depth from soil surface to bottom of layer (mm)	−0.5	0.5	−0.17
v__CH_N2.rte	主河道河床曼宁系数 Mainning's n value for the main channel	0	0.3	0.14
r__SOL_ALB.sol	湿润土壤反照率 Moist soil albedo	−0.5	0.5	0.12
v__REVAPMN.gw	浅层含水层"再蒸发"或渗透到深层含水层的阈值深 Threshold depth of water in the shallow aquifer for "revap" or percolation to the deep aquifer to occur (mm)	0	500	111.25

v__: 参数值被给定值代替或绝对变化; r__: 参数值乘以(1+给定值)或相对改变。v__: the parameter value is replaced by given value or absolute change; r__: the parameter value is multiplied by (1 + a given value) or relative change.

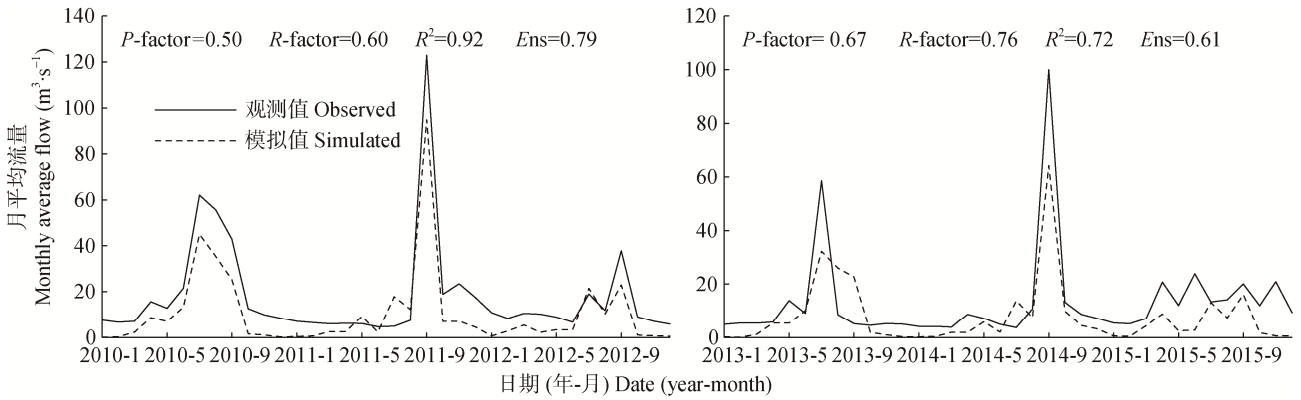

图 3 伊洛河上游流域灵口水文站率定期(左)和验证期(右)的月平均流量模拟结果

Fig. 3 Monthly average flows in calibration (left) and validation (right) periods of the Lingkou Hydrological Station in the upper reaches of the Yiluo River

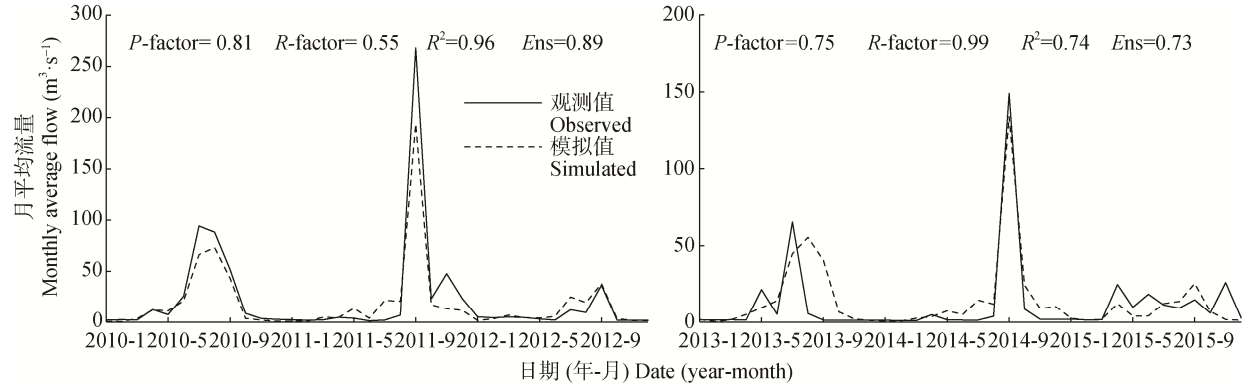

图 4 伊洛河上游流域卢氏水文站率定期(左)和验证期(右)的月平均流量模拟结果

Fig. 4 Monthly average flows in calibration (left) and validation (right) periods of the Lushi Hydrological Station in the upper reaches of the Yiluo River

表 4　伊洛河上游流域逐年水文要素平衡和变化情况

Table 4　Balance and change of hydrological elements in the upper reaches of the Yiluo River　$\times 10^8 m^3$

年份 Year	PRECIP	WR	SURQ	LATQ	GWQ	WYLD	PERC	SW	⊿SW	ET	⊿SW*
2010	38.63	37.77	7.26	6.16	3.09	16.51	3.95	3.29	–2.51	23.77	–2.51
2011	42.49	40.65	6.78	7.31	3.67	17.76	5.50	6.06	2.77	20.12	2.78
2012	26.09	26.48	2.09	3.71	0.73	6.53	0.36	3.72	–2.34	22.29	–2.36
2013	28.56	28.17	3.44	4.12	0.17	7.73	0.57	3.07	–0.65	21.09	–0.66
2014	37.81	35.99	3.71	6.32	1.25	11.28	3.08	5.81	2.75	21.96	2.74
2015	36.08	35.47	3.45	5.06	0.67	9.18	1.27	4.84	–0.97	27.26	–0.96
平均 Average	34.94	34.09	4.45	5.45	1.60	11.50	2.46	4.47	–0.16	22.75	–0.16

PRECIP: 多年平均降水量; WR: 蓝水绿水资源总量; SURQ: 地表径流; LATQ: 壤中流; GWQ: 回归流; WYLD: 产水量; PERC: 渗漏量; SW: 土壤含水量; ⊿SW：一段时间内土壤中的含水量变化; ET: 实际蒸散量。PRECIP: annual average precipitation; WR: total amount of blue water and green water resources; SURQ: surface runoff; LATQ: lateral flow; GWQ: return flow; WYLD: water yield; PERC: percolation flow; SW: soil water content; ⊿SW: change of soil water content; ET: actual evapotranspiration; ⊿SW*=PRECIP–SURQ–ET–PERC–LATQ; WYLD=SURQ+LATQ+GWQ.

土壤含水量多年平均为 65~157 mm。

2.3　不同水文年型下土地利用变化对水文要素的影响评估

2.3.1　丰水年

按照不同水文年型，对土地利用变化下各水文要素变化情况进行分析。根据 1980—2016 年降水数据，采用皮尔逊III型频率曲线法，划分水文年型[42]。其中，*P*=25%时，丰水年降水量 735 mm，*P*=50%，平水年降水量 648 mm，*P*=75%，枯水年降水量为 567 mm。根据模型运行 2009—2015 年数据，得出不同水文年型下，各个水文要素变化情况及趋势显著性。

与丰水年初始土地利用类型的水文要素相比，得到不同情景下各水文要素变化率(表 5)。各情景下产水量变化率均减少，但趋势都不显著。只有情景 6 的产水量变化率为–4.48%，趋势极显著，其余情景下变化率均不显著。分析产水量组成各项分量可以看出：所有情景的地表径流都为减少，除情景 1 和情景 4 外，其余情景下变化趋势极显著，减少程度从大到小分别为情景 3>情景 6>情景 2>情景 5。壤中流在各情景下均呈现出增加趋势，但趋势不显著，即不同程度的退耕还林或者还草，对其并没有太大影响。回归流在情景 1~4 和情景 6 时，变化率都增加，只有在情景 3 时变化趋势极显著；情景 5 的回归流变化率减少，但变化趋势不显著。渗漏量变化率在情景 1~4 和情景 6 都增加，在情景 5 时减少，但变化趋势均不显著。土壤含水量在情景 1~6 时变化率都减少，但趋势均不显著。实际蒸散量在情景 1~6 时变化率都呈增加趋势，但变化趋势都不显著。

由上可知：丰水年，在不同情景下蓝水资源量均减少，只有在全部耕地退耕还草情景时蓝水资源量减少趋势极显著，其余情景下均不显著。但各情景下蓝水资源量中地表径流分量都减少，15°以上坡耕地退耕还林或还草及全部耕地退耕还林或还草情景时，变化趋势极显著。退耕还林或还草对地表径流影响较大。即：随着耕地面积的减少，林、草地面积增多，地表径流减少越多，且林地的减少量大于草地减少量。这可能是因为当耕地转换为林地或者草地时，根据水量平衡原理，水文要素中的壤中流、渗漏量和实际蒸散量基本都表现为增加，导致地表径流的减少。因此，退耕还林还草后地表径流减少，可减少水土流失。退耕还林或还草情景下对壤中流分量的影响不具备统计意义上的显著性。回归流只有在全部耕地退耕还林情景时增加趋势极显著。不同程度退耕还林或还草情景时绿水流均增加，绿水库均减少，但变化趋势均不显著。

2.3.2　平水年

与平水年初始土地利用类型的水文要素相比，得到不同情景下各水文要素变化率(表 6)。各情景下产水量变化率均减少，但趋势都不显著。分析产水量组成各项分量可以看出：所有情景的地表径流都减少，除情景 4 外，其余情景下变化趋势极显著，减少量从大到小分别为情景 3>情景 6>情景 2>情景 5>情景 1。壤中流分量变化率除情景 4 减少外，其余情景下变化率都增加，但趋势均不显著。回归流分量在情景 1~4 下，变化率均增加，只有在情景 3 时变化趋势显著；在情景 5~6 下，变化率均减少，但趋势都不显著。渗漏量在情景 1~4 下，变化率均增加，在情景 5~6 下，变化率均减少，但趋势均不显著。土壤含水量在情景 1~6 时，变化率都减少，但趋势均不显著。各个情景下的实际蒸散量，变化率都表现为增加，但变化趋势都不显著。

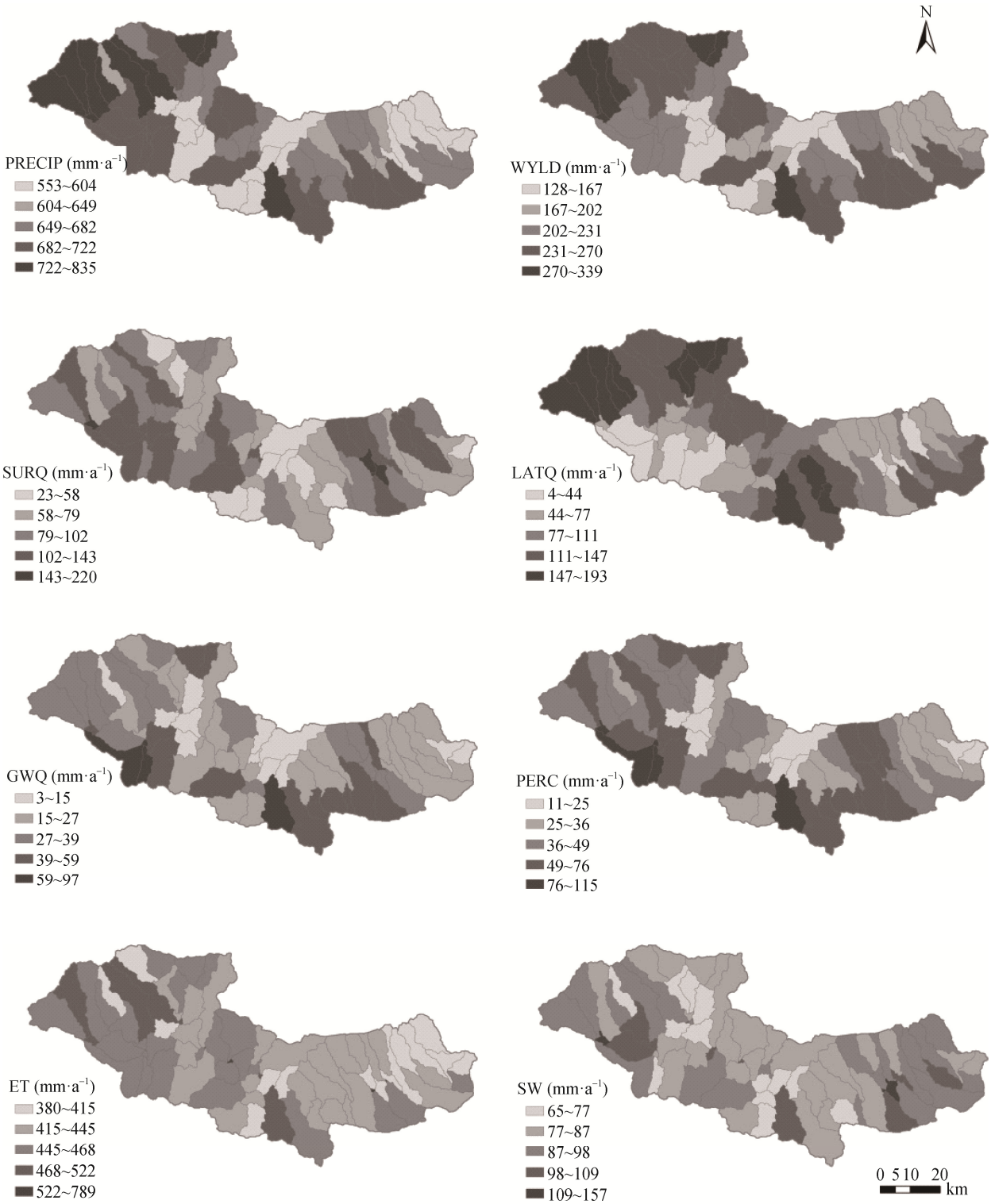

图 5　伊洛河上游流域多年平均降水量(PRECIP)、产水量(WYLD)、地表径流(SURQ)、壤中流(LATQ)、回归流(GWQ)、渗漏量(PERC)、实际蒸散量(ET)和土壤含水量(SW)

Fig. 5　Annual average precipitation (PRECIP), water yield (WYLD), surface runoff (SURQ), lateral flow (LATQ), return flow (GWQ), percolation flow (PERC), actual evapotranspiration (ET), and soil water content (SW) in the upper reaches of the Yiluo River

由上可知: 平水年, 在各情景下蓝水资源量均减少, 但不具备统计意义上的显著性, 而蓝水资源量中地表径流分量, 25°以上坡耕地退耕还林、15°以上坡耕地退耕还林或还草、全部耕地退耕还林或还草情景时, 变化趋势极显著, 这可能由于耕地面积转化成林地或者草地越多, 导致地表径流量减少, 且林地的减少量大于草地减少量。壤中流分量在不同情景时变化趋势均不显著。回归流分量只有在全部耕

表 5　不同退耕还林/还草情景模拟下丰水年伊洛河上游流域各水文要素变化率

Table 5　Change rates of hydrological elements in the upper reaches of the Yiluo River during the wet year under different scenario simulation of Grain-for-Green　%

年型 Year type	情景模拟 Scenario simulation	SURQ	LATQ	GWQ	PERC	SW	ET	WYLD
丰水年 Wet year	情景 1 Scenario 1	−4.11	0.98	4.18	2.74	−1.41	0.48	−0.43
	情景 2 Scenario 2	−12.79**	5.98	7.33	4.72	−4.44	1.33	−1.36
	情景 3 Scenario 3	−21.55**	5.38	19.85**	14.12	−6.83	2.35	−2.57
	情景 4 Scenario 4	−2.63	0.26	0.58	0.32	−2.28	0.54	−0.85
	情景 5 Scenario 5	−8.74**	3.66	−1.31	−1.21	−6.50	1.59	−2.38
	情景 6 Scenario 6	−13.29**	1.80	1.05	0.88	−10.49	3.06	−4.48**

SURQ: 地表径流; LATQ: 壤中流; GWQ: 回归流; PERC: 渗漏量; SW: 土壤含水量; ET: 实际蒸散量; WYLD: 产水量。SURQ: surface runoff; LATQ: lateral flow; GWQ: return flow; PERC: percolation flow; SW: soil water content; ET: actual evapotranspiration; WYLD: water yield; **: $P < 0.01$, *: $P < 0.05$.

表 6　不同退耕还林/还草情景模拟下平水年伊洛河上游流域各个水文要素变化率

Table 6　Change rates of hydrological elements in the upper reaches of the Yiluo River during the normal year under different scenario simulation of Grain-for-Green　%

年型 Year type	情景模拟 Scenario simulation	SURQ	LATQ	GWQ	PERC	SW	ET	WYLD
平水年 Normal year	情景 1 Scenario 1	−5.13**	0.31	6.30	3.29	−0.23	0.47	−0.99
	情景 2 Scenario 2	−17.00**	4.79	8.31	3.90	−1.21	1.20	−2.44
	情景 3 Scenario 3	−28.48**	4.02	35.47*	15.89	−1.61	2.16	−4.20
	情景 4 Scenario 4	−3.20	−0.18	1.71	0.70	−1.24	0.42	−1.04
	情景 5 Scenario 5	−11.71**	2.84	−4.25	−2.64	−3.61	1.17	−2.91
	情景 6 Scenario 6	−18.28**	0.97	−4.81	−3.42	−5.23	2.30	−6.26

SURQ: 地表径流; LATQ: 壤中流; GWQ: 回归流; PERC: 渗漏量; SW: 土壤含水量; ET: 实际蒸散量; WYLD: 产水量。SURQ: surface runoff; LATQ: lateral flow; GWQ: return flow; PERC: percolation flow; SW: soil water content; ET: actual evapotranspiration; WYLD: water yield; **: $P < 0.01$, *: $P < 0.05$.

地退耕还林情景时增加趋势显著。不同情景下绿水流均增加, 绿水库均减少, 但变化趋势均不显著。

2.3.3　枯水年

与枯水年初始土地利用类型的水文要素相比, 得到不同情景下各水文要素变化率(表 7)。所有情景下产水量变化率都减少, 但趋势均不显著。地表径流分量只有在情景 3 时变化率为−27.80%, 趋势显著, 其余情景时变化趋势均不显著。壤中流分量在不同情景下变化率都增加, 但趋势都不显著。回归流分量在情景 1~3 时, 变化率都增加, 情景 4~6 时都减少, 但趋势均不显著。渗漏量变化率除情景 5 减少外, 其余情景下都增加, 且情景 3 下, 变化率为 50.83%, 变化趋势极显著。土壤含水量在各个情景时, 变化率均减少, 其中情景 5 变化率为−10.41%, 趋势显著, 情景 6 变化率为−18.84%, 趋势极显著。实际蒸散量在所有情景下, 变化率均呈增加趋势, 但只有在情景 6 时, 变化趋势显著。

由上可知: 枯水年, 不同情景下蓝水资源量均减少, 但变化趋势不显著, 蓝水资源量中的地表径流分量只有在全部退耕还林情景时, 减少趋势显著。各个情景下壤中流分量和回归流分量不具备统计意义上的显著性。不同情景下绿水流均增加, 只有在全部退耕还草情景时, 变化趋势显著。不同情景时绿水库均减少, 绿水库在 15°以上退耕还草情景时, 变化趋势显著; 全部耕地退耕还草情景时, 变化趋势极显著。

3　结论与讨论

3.1　结论

1)灵口和卢氏水文站率定期和验证期 R^2 在 0.7 以上, *E*ns 效率系数在 0.6 以上, 模拟效果较好。对结果进行不确定分析, 不确定程度小, 模拟结果与实际情况比较吻合。

2)2010—2015 年多年平均降水资源总量为 34.94 亿 m^3, 多年平均蓝水绿水资源总量为 34.09 亿 m^3, 蓝水资源量多年平均为 11.50 亿 m^3, 占多年蓝水绿水资源总量 33.73%。绿水资源量占多年蓝水绿水资源总量的 66.27%, 绿水库变化量为 0.16 亿 m^3, 绿水流多年平均为 22.75 亿 m^3。

3)伊洛河上游多年平均降水量各子流域空间上分布不均匀, 整体来看上游高于中下游。蓝水资源量的变化大致是上游>下游>中游。绿水流变化范围

表 7 不同退耕还林/还草情景模拟下枯水年伊洛河上游流域各个水文要素变化率

Table 7 Change rates of hydrological elements in the upper reaches of the Yiluo River during the dry year under different scenario simulation of Grain-for-Green %

年型 Year type	情景模拟 Scenario simulation	SURQ	LATQ	GWQ	PERC	SW	ET	WYLD
枯水年 Dry year	情景 1 Scenario 1	−5.09	0.73	2.38	7.28	−0.47	0.28	−1.36
	情景 2 Scenario 2	−17.54	5.75	4.20	15.51	−0.70	0.77	−3.28
	情景 3 Scenario 3	−27.80*	4.97	32.61	50.83**	−1.00	1.29	−5.68
	情景 4 Scenario 4	−3.85	0.41	−1.19	1.16	−3.38	0.57	−1.33
	情景 5 Scenario 5	−13.87	4.08	−6.64	−0.28	−10.41*	1.60	−3.55
	情景 6 Scenario 6	−20.40	2.23	−5.62	4.53	−18.84**	3.25*	−7.00

SURQ: 地表径流; LATQ: 壤中流; GWQ: 回归流; PERC: 渗漏量; SW: 土壤含水量; ET: 实际蒸散量; WYLD: 产水量。SURQ: surface runoff; LATQ: lateral flow; GWQ: return flow; PERC: percolation flow; SW: soil water content; ET: actual evapotranspiration; WYLD: water yield; **: $P < 0.01$, *: $P < 0.05$.

大致为上游>中游>下游。绿水库中游含量较低。

4)丰水年, 在不同情景时蓝水资源量均减少, 只有在全部退耕还草情景时蓝水资源量减少趋势极显著, 其余情景下均不显著。但各情景下蓝水资源量中地表径流分量都减少, 15°以上坡耕地退耕还林或还草、全部耕地退耕还林或还草情景时, 变化趋势极显著, 退耕还林或者还草对地表径流影响较大, 回归流分量只有在全部退耕还林情景时增加趋势极显著。各情景下对壤中流分量, 不具备统计意义上的显著性。不同情景下绿水流均增加, 绿水库均减少, 但不具备统计意义上的显著性。平水年, 在各个情景时蓝水资源量均减少, 但不具备统计意义上的显著性, 而蓝水资源量中地表径流分量, 25°以上坡耕地退耕还林、15°以上坡耕地退耕还林或还草、全部耕地退耕还林或还草情景时, 变化趋势极显著。壤中流分量在不同情景时变化趋势均不显著。回归流分量只有在全部耕地退耕还林情景时增加趋势显著。不同情景下绿水流均增加, 绿水库均减少, 但不具备统计意义上的显著性。枯水年, 在不同情景时蓝水资源量均减少, 但变化趋势不显著, 蓝水资源量中的地表径流分量只有在全部退耕还林情景时, 减少趋势显著; 壤中流分量和回归流分量不具备统计意义上的显著性。不同情景下绿水流均增加, 只有全部退耕还草情景时, 变化趋势显著。不同情景下绿水库均减少, 在 15°以上退耕还草情景时, 变化趋势显著; 全部耕地退耕还草情景时, 变化趋势极显著。

3.2 讨论

2010—2015 年, 伊洛河上游流域蓝水资源量多年平均为 11.50 亿 m^3, 其中的地表径流分量占 39%, 壤中流分量占 47%, 回归流分量占 14%。绿水资源量占蓝水绿水资源总量的 66.27%。甄婷婷等[43]研究表明, 1991—1997 年研究区内蓝水资源 3.27 亿 m^3, 绿水资源量为 27.43 亿 m^3, 占总量的 89%以上。可以看出近年来蓝水资源有所上升, 绿水资源量有所下降, 但绿水资源量相当可观, 虽不能被人类直接利用, 但可被植物利用, 间接转化成可利用的水资源量[44]。本文对蓝水资源量的分析, 也具体到地表径流、壤中流、回归流的变化, 较之前的研究更为细致。通过本研究也进一步强调了绿水的重要性, 应该把绿水资源纳入到水资源评价体系中, 对该区域水资源的利用与管理具有重要意义[7]。

在不同程度退耕还林或者还草情景时, 蓝水资源量均减少, 绿水流均增加, 绿水库均减少。在丰水年和平水年时, 对蓝水资源量中地表径流分量影响较明显。罗巧等[45]研究表明, 在湘江流域运用 SWAT 模型, 研究土地利用变化对径流影响, 增加林地和草地面积将减少径流。本研究进一步考虑各个水文年型下, 当增加林地或草地面积时, 地表径流都表现为减少, 且林地减少量大于草地。并应用统计方法中单因素方差分析和多重比较分析水文要素的变化趋势显著性, 可以看出, 在丰水年和平水年, 不同程度退耕还林或者还草对地表径流影响较为显著。研究结果对于土地资源和水资源合理利用, 保护生态系统健康具有一定的现实意义。

本文运用 SWAT 模型, 在退耕还林还草背景下, 设置了 6 种不同的情景, 应用单因素方差分析和多重比较, 根据不同的水文年型分析土地利用/覆被变化对伊洛河上游流域蓝水绿水分配的影响, 对研究区水土资源的合理利用具有重要意义。当前研究对水文循环过程的分析, 仅仅考虑了不同土地利用变化影响, 随着研究的深入, 还可以考虑其他变化要素(如气候变化等)的影响, 更加全面地研究水土资源的变化影响。对水文过程分析还可以拓宽到对泥沙、水质、面源污染等过程的研究。

参考文献 References

[1] 夏军, 翟金良, 占车生. 我国水资源研究与发展的若干思考[J]. 地球科学进展, 2011, 26(9): 905–915
XIA J, ZHAI J L, ZHAN C S. Some reflections on the research and of development water resources in China[J]. Advances in Earth Sciences, 2011, 26(9): 905–915

[2] MALIN F, ZDZISLAW M. The key role of water in the landscape system[J]. GeoJournal, 1994, 33(4): 355–363

[3] 李保国, 黄峰. 蓝水和绿水视角下划定“中国农业用水红线”探索[J]. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3493–3503
LI B G, HUANG F. Defining the baselines for China agricultural water use in green and blue water approach[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(17): 3493–3503

[4] FALKENMARK M, ROCKSTRÖM J. The new blue and green water paradigm: Breaking new ground for water resources planning and management[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2006, 132(3): 129–132

[5] SCHUOL J, ABBASPOUR K C, YANG H, et al. Modeling blue and green water availability in Africa[J]. Water Resources Research, 2008, 44(7): W07406

[6] RINGERSMA J, BATJES N H, DENT D. Green water: Definitions and data for assessment[R]. Wageningen, Netherlands: ISRIC-World Soil Information, 2003

[7] 程国栋, 赵文智. 绿水及其研究进展[J]. 地球科学进展, 2006, 21(3): 221–227
CHENG G D, ZHAO W Z. Green water and its research progresses[J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(3): 221–227

[8] VIALA E. Water for food, water for life a comprehensive assessment of water management in agriculture[J]. Irrigation and Drainage Systems, 2008, 22(1): 127–129

[9] 甘红, 刘彦随, 李宪文. 区域土地利用变化与水资源利用相关分析[J]. 南京师大学报: 自然科学版, 2003, 26(3): 82–88
GAN H, LIU Y S, LI X W. Analysis of the correlativity between regional land use change and water resources optimal use[J]. Journal of Nanjing Normal University: Natural Science, 2003, 26(3): 82–88

[10] 王艳君, 吕宏军, 施雅风, 等. 城市化流域的土地利用变化对水文过程的影响——以秦淮河流域为例[J]. 自然资源学报, 2009, 24(1): 30–36
WANG Y J, LV H J, SHI Y F, et al. Impacts of land use changes on hydrological processes in an urbanized basin — a case study in the Qinhuai River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(1): 30–36

[11] 王宗明, 张树清, 张柏. 土地利用变化对三江平原生态系统服务价值的影响[J]. 中国环境科学, 2004, 24(1): 125–128
WANG Z M, ZHANG S Q, ZHANG B. Effects of land use change on values of ecosystem services of Sanjiang Plain, China[J]. China Environmental Science, 2004, 24(1): 125–128

[12] 丁新辉, 谢永生, 魏富娟, 等. 波状坡耕地拦挡淀排技术水沙调控效果[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(3): 123–129
DING X H, XIE Y S, WEI F J, et al. Regulating effects of the interception-precipitation-drainage technology on water and sediment in wave type slope farmland[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2016, 14(3): 123–129

[13] 柳礼香. 商洛市坡耕地水土流失现状及治理对策[J]. 中国水土保持, 2017, (6): 6–8
LIU L X. Current situation of soil and water loss on slope land in Shangluo City and control measures[J]. Soil and Water Conservation in China, 2017, (6): 6–8

[14] 黄少燕, 查轩. 坡耕地侵蚀过程与土壤理化特性演变[J]. 山地学报, 2002, 20(3): 290–295
HUANG S Y, ZHA X. Study on soil erosion process and evolution of soil physicochemisty characteristics on sloping farmland[J]. Journal of Mountain Science, 2002, 20(3): 290–295

[15] 孙泉忠, 刘瑞禄, 陈菊艳, 等. 贵州省石漠化综合治理人工种草对土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 67–72
SUN Q Z, LIU R L, CHEN J Y, et al. Effect of planting grass on soil erosion in karst demonstration areas of rocky desertification integrated rehabilitation in Guizhou Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(4): 67–72

[16] 王一超, 郝海广, 翟瑞雪, 等. 农户退耕还林生态补偿预期及其影响因素——以哈巴湖自然保护区和六盘山自然保护区为例[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(8): 69–75
WANG Y C, HAO H G, ZHAI R X, et al. Determinants of farm households' ecological compensation expectation to the Grain for Green Project: An empirical analysis based on Haba Lake National Nature Reserve and Liupanshan Mountain National Nature Reserve[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(8): 69–75

[17] 史晓亮, 李颖, 杨志勇. 基于 SWAT 模型的诺敏河流域径流对土地利用/覆被变化的响应模拟研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(1): 65–69
SHI X L, LI Y, YANG Z Y. Response of runoff on land use/cover change in Nuomin River Basin based on SWAT model[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(1): 65–69

[18] 王莺, 张强, 王劲松, 等. 基于分布式水文模型(SWAT)的土地利用和气候变化对洮河流域水文影响特征[J]. 中国沙漠, 2017, 37(1): 175–185
WANG Y, ZHANG Q, WANG J S, et al. Appling SWAT Model to explore the impacts of land use and climate changes on the hydrological characteristics in Taohe River Basin[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(1): 175–185

[19] ALEMAYEHU T, VAN GRIENSVEN A, TADDESSE WOLDEGIORGIS B, et al. An improved SWAT vegetation growth module and its evaluation for four tropical ecosystems[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(9): 4449–4467

[20] 袁宇志, 张正栋, 蒙金华. 基于 SWAT 模型的流溪河流域土地利用与气候变化对径流的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 26(4): 989–998
YUAN Y Z, ZHANG Z D, MENG J H. Impact of changes in land use and climate on the runoff in Liuxihe Watershed based on SWAT model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 26(4): 989–998

[21] ARNOLD J, SRINIVASAN R, NEITSCH S, et al. Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Global Applications[M]. Bangkok, Thailand: World Association of Soil and Water Conservation, 2009: 3–4

[22] GEBREMICAEL T G, MOHAMED Y A, BETRIE G D, et al. Trend analysis of runoff and sediment fluxes in the upper blue Nile basin: A combined analysis of statistical tests, physically-based models and Landuse maps[J]. Journal of Hydrology, 2013, 482(9): 57–68

[23] 黎云云, 畅建霞, 王义民, 等. 渭河流域径流对土地利用变

化的时空响应[J]. 农业工程学报, 2016, 32(15): 232–238
LI Y Y, CHANG J X, WANG Y M, et al. Spatiotemporal responses of runoff to land use change in Wei River Basin[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(15): 232–238

[24] 耿润哲, 李明涛, 王晓燕, 等. 基于 SWAT 模型的流域土地利用格局变化对面源污染的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 241–250
GENG R Z, LI M T, WANG X Y, et al. Effect of land use/landscape changes on diffuse pollution load from watershed based on SWAT model[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(16): 241–250

[25] GAO X X, ZUO D P, XU Z X, et al. Evaluation of blue and green water resources in the upper Yellow River basin of China[J]. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 2018, 379: 159–167

[26] VEETTIL A V, MISHRA A K. Water security assessment using blue and green water footprint concepts[J]. Journal of Hydrology, 2016, 542: 589–602

[27] FARAMARZI M, ABBASPOUR K C, SCHULIN R, et al. Modelling blue and green water resources availability in Iran[J]. Hydrological Processes, 2009, 23(3): 486–501

[28] GLAVAN M, PINTAR M, VOLK M. Land use change in a 200-year period and its effect on blue and green water flow in two Slovenian Mediterranean catchments — Lessons for the future[J]. Hydrological Processes, 2013, 27(26): 3964–3980

[29] 荣琨, 陈兴伟. 用 SWAT 模拟土地利用对绿水蓝水的影响: 以晋江西溪流域为例[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(1): 199–204
RONG K, CHEN X W. Simulation of the effect of land use/cover change on green and blue water resource in Xixi watershed of Jinjiang Basin with SWAT model[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(1): 199–204

[30] 张杰, 贾绍凤. 基于 SWAT 模型的湟水流域蓝绿水与不同土地利用类型的绿水差异研究[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(4): 6–10
ZHANG J, JIA S F. Study on difference of blue-green water in Huangshui basin and green water under different types of land use based on SWAT model[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2013, 24(4): 6–10

[31] ARNOLD J G, SRINIVASAN R, RAMANARAYANAN T S, et al. Water resources of the Texas gulf basin[J]. Water Science and Technology, 1999, 39(3): 121–133

[32] DI LUZIO M, SRINIVASAN R, ARNOLD J G. A GIS-coupled hydrological model system for the watershed assessment of agricultural nonpoint and point sources of pollution[J]. Transactions in GIS, 2004, 8(1): 113–136

[33] 李国平, 石涵予. 退耕还林生态补偿标准、农户行为选择及损益[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(5): 152–161
LI G P, SHI H Y. The payment of grain to green project, the behavior choice of peasants and their gains and losses[J]. China Population Resources and Environment, 2015, 25(5): 152–161

[34] 杨小勇. 方差分析法浅析——单因素的方差分析[J]. 实验科学与技术, 2013, 11(1): 41–43
YANG X Y. Discussion of variance analysis: The single factor variance analysis[J]. Experiment Science and Technology, 2013, 11(1): 41–43

[35] ABBASPOUR K C, JOHNSON C A, VAN GENUCHTEN M T. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure[J]. Vadose Zone Journal, 2004, 3(4): 1340–1352

[36] ABBASPOUR K C, YANG J, MAXIMOV I, et al. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT[J]. Journal of Hydrology, 2007, 333(2/4): 413–430

[37] 降亚楠, 王蕾, 魏晓妹, 等. 基于 SWAT 模型的气候变化对泾河径流量的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 262–270
JIANG Y N, WANG L, WEI X M, et al. Impacts of climate change on runoff of Jinghe River based on SWAT model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 262–270

[38] ROUHOLAHNEJAD E, ABBASPOUR K C, VEJDANI M, et al. A parallelization framework for calibration of hydrological models[J]. Environmental Modelling & Software, 2012, 31: 28–36

[39] 左德鹏, 徐宗学. 基于 SWAT 模型和 SUFI-2 算法的渭河流域月径流分布式模拟[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2012, 48(5): 490–496
ZUO D P, XU Z X. Distributed hydrological simulation using SWAT and SUFI-2 in the Wei River Basin[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2012, 48(5): 490–496

[40] GOWDA P H, MULLA D J, DESMOND E D, et al. ADAPT: Model use, calibration, and validation[J]. Transactions of the ASABE, 2012, 55(4): 1345–1352

[41] SCHUOL J, ABBASPOUR K C, SRINIVASAN R, et al. Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model[J]. Journal of Hydrology, 2008, 352(1/2): 30–49

[42] 孙翔, 邢勇志. EXCEL 在水文频率分析中的应用[J]. 江淮水利科技, 2006, (6): 42–44
SUN X, XING Y Z. Application of Excel in hydrological frequency analysis[J]. Jianghuai Water Resources Science and Technology, 2006, (6): 42–44

[43] 甄婷婷, 徐宗学, 程磊, 等. 蓝水绿水资源量估算方法及时空分布规律研究——以卢氏流域为例[J]. 资源科学, 2010, 32(6): 1177–1183
ZHEN T T, XU Z X, CHENG L, et al. Spatiotemporal distributions of blue and green water resources: A case study on the Lushi watershed[J]. Resources Science, 2010, 32(6): 1177–1183

[44] 杨国胜, 黄介生, 李建, 等. 基于 SWAT 模型的绿水管理生态补偿标准研究[J]. 水利学报, 2016, 47(6): 809–815
YANG G S, HUANG J S, LI J, et al. Study on ecological compensation standard of green water management based on SWAT model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(6): 809–815

[45] 罗巧, 王克林, 王勤学. 基于 SWAT 模型的湘江流域土地利用变化情景的径流模拟研究[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(6): 1431–1436
LUO Q, WANG K L, WANG Q X. Using SWAT to simulate runoff under different land use scenarios in Xiangjiang River Basin[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(6): 1431–1436