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

太行山区不同植被条件下土壤水分动态变化特征研究

司梦可，曹建生，阳辉，朱春雨

引用本文:
司梦可, 曹建生, 阳辉, 等. 太行山区不同植被条件下土壤水分动态变化特征研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(11): 1766–1777.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200172

(向下翻页，阅读全文)

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同施氮量下干旱胁迫对棉花生长及种内关系的影响

Effects of drought stress on cotton growth and intraspecific relationship under different nitrogen application rates

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(5): 643–651 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190791

沙坡头区直插式根灌条件下土壤水分变化分析

Variation in soil water in Shapotou Area under straight–tube root irrigation

中国生态农业学报. 2017, 25(1): 104–117 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160596

绿洲灌区玉米产量形成及水分利用特征对地膜覆盖方式及行距的响应

Responses of grain yield formation and water use characteristic of maize to plastic film mulching pattern and row spacing in oasis irrigation area in Northwest China

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(5): 662–670 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190828

施氮及添加硝化抑制剂对苜蓿草地N_2O排放的影响

Effects of nitrogen application and nitrification inhibitor addition on N_2O emissions in *Medicago sativa* L. grassland

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(3): 317–327 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190511

陕北黄土丘陵区山地苹果园的土壤水分动态研究

Soil moisture dynamics of apple orchards in Loess Hilly Area of northern Shaanxi Province

中国生态农业学报. 2017, 25(5): 749–758 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160758

中国生态农业学报(中英文) 2020 年 11 月 第 28 卷 第 11 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Nov. 2020, 28(11): 1766−1777

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200172

司梦可, 曹建生, 阳辉, 朱春雨. 太行山区不同植被条件下土壤水分动态变化特征研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(11): 1766−1777
SI M K, CAO J S, YANG H, ZHU C Y. Soil water variation of different vegetation community in Taihang Mountain Area[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(11): 1766−1777

太行山区不同植被条件下土壤水分动态变化特征研究*

司梦可[1,2], 曹建生[1**], 阳 辉[1], 朱春雨[1]

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/中国科学院农业水资源重点实验室 石家庄 050022;
2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘 要: 为了解太行山区主要植被类型的土壤水分状况, 选取太行山区 4 种典型植被——小麦/玉米(农作物)、黄背草(草本)、荆条(灌木)和核桃(乔木), 利用大型称重式蒸渗仪, 监测了 4 种植被 2018 年和 2019 年生长季(4—10 月)的土壤水分、深层渗漏和蒸散发要素, 并利用数理统计方法分析了土壤含水量的变化特征。结果表明, 2018 年小麦/玉米、黄背草、荆条和核桃地平均土壤含水量分别为 0.30 $cm^3 \cdot cm^{-3}$、0.35 $cm^3 \cdot cm^{-3}$、0.32 $cm^3 \cdot cm^{-3}$ 和 0.36 $cm^3 \cdot cm^{-3}$, 而 2019 年平均土壤含水量分别为 0.28 $cm^3 \cdot cm^{-3}$、0.26 $cm^3 \cdot cm^{-3}$、0.23 $cm^3 \cdot cm^{-3}$ 和 0.31 $cm^3 \cdot cm^{-3}$, 相比于 2017 年生长季末(11 月)土壤含水量, 2018 年小麦/玉米、黄背草、荆条和核桃地土壤含水量下降幅度分别为 0.05 $cm^3 \cdot cm^{-3}$、0.04 $cm^3 \cdot cm^{-3}$、0.09 $cm^3 \cdot cm^{-3}$ 和 0.05 $cm^3 \cdot cm^{-3}$, 2019 年下降幅度分别为 0.07 $cm^3 \cdot cm^{-3}$、0.13 $cm^3 \cdot cm^{-3}$、0.18 $cm^3 \cdot cm^{-3}$ 和 0.10 $cm^3 \cdot cm^{-3}$, 荆条地土壤水分的下降幅度最大, 小麦/玉米地下降幅度最小。在垂直方向上, 4 种植被土壤水分变化趋势一致, 随着土层深度的增加土壤含水量逐渐降低, 但对土壤水分的获取深度有所差异。土壤水分获取深度小麦/玉米主要为 45~100 cm, 黄背草和核桃主要为 100~150 cm, 荆条主要为 150~180 cm。形成这一结果的原因可能是根系分布的差异, 小麦/玉米和黄背草为禾本科植物, 根系分布在浅层土壤, 虽然核桃为乔木, 但其为浅根植物, 而荆条在主根周围分布有丰富的侧根, 且主根延伸到土层深部, 能够获取深层土壤水分。这表明荆条是该地区主要耗水物种, 在太行山区绿化植被的选取和生态系统的管理和修复中, 应尽量减少荆条的覆盖面积。

关键词: 太行山区; 蒸渗仪测量; 土壤水分; 根系分布; 植被类型

中图分类号: S157.2 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Soil water variation of different vegetation community in Taihang Mountain Area*

SI Mengke[1,2], CAO Jiansheng[1**], YANG Hui[1], ZHU Chunyu[1]

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* 国家重点研发计划项目(2018YFC0406501-02)、国家自然基金项目(41877170)、河北省重点研发计划项目(20324203D)和河北省创新能力提升计划项目(20536001D)资助

** 通信作者: 曹建生, 主要从事山地生态水文过程与降水资源调控机制研究。E-mail: caojs@sjziam.ac.cn
司梦可, 主要研究方向为山地生态水文过程研究。E-mail: 13253671220@163.com

收稿日期: 2020-03-08 接受日期: 2020-07-21

* This study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2018YFC0406501-02), the National Natural Science Foundation of China (41877170), the Key Research and Development Project of Hebei Province, China (20324203D), and the Promotion Project of Creation Ability of Hebei Province, China (20536001D).

** Corresponding author, E-mail: caojs@sjziam.ac.cn

Received Mar. 8, 2020; accepted Jul. 21, 2020

Abstract: Soil water storage and movement are highly heterogeneous across ecosystems. However, variation characteristics of soil moisture are not well understood at present, due to the high heterogeneity of environmental conditions. The Taihang Mountain region is an important water collection area of the North China Plain, and a functional area for water conservation in the national Beijing-Tianjin-Hebei coordinated development strategy. However, little is known about the soil water regime of the main plant species that inhabit this region. In this study, the soil water content for four representative vegetation types, *Triticum aestivum*/*Zea mays*, *Themeda triandra* var. *Japonica*, *Vitex negundo* var. *heterophylla* and *Juglans regia*, that are widely distributed in the semi-arid area of the Taihang Mountain, were observed using large scale weighing lysimeters, during the growing season (April to October) in 2018 and 2019. Weighing lysimeters systematically measured the soil water content, seepage, and evapotranspiration among different vegetation communities, and the collected data on the variation characteristic of soil moisture content for four vegetation types were analyzed by means of statistical analysis. The results showed that average soil water content for *T. aestivum*/*Z. mays*, *T. triandra*, *V. negundo*, and *J. regia* were 0.30 $cm^3 \cdot cm^{-3}$, 0.35 $cm^3 \cdot cm^{-3}$, 0.32 $cm^3 \cdot cm^{-3}$ and 0.36 $cm^3 \cdot cm^{-3}$ in 2018, and 0.28 $cm^3 \cdot cm^{-3}$, 0.26 $cm^3 \cdot cm^{-3}$, 0.23 $cm^3 \cdot cm^{-3}$ and 0.31 $cm^3 \cdot cm^{-3}$ in 2019, respectively. Similarly, the decrease of soil water content for *T. aestivum*/*Z. mays*, *T. triandra*, *V. negundo,* and *J. regia* were 0.05 $cm^3 \cdot cm^{-3}$, 0.04 $cm^3 \cdot cm^{-3}$, 0.09 $cm^3 \cdot cm^{-3}$, and 0.05 $cm^3 \cdot cm^{-3}$ in 2018, and 0.07 $cm^3 \cdot cm^{-3}$, 0.13 $cm^3 \cdot cm^{-3}$, 0.18 $cm^3 \cdot cm^{-3}$, and 0.10 $cm^3 \cdot cm^{-3}$ in 2019, respectively, compared to the soil water content at the end of growing season (December) of 2017. The decrease of the soil water content for *V. negundo* was greatest, and that for *T. aestivum*/*Z. mays* was the smallest, among the four vegetation types. The direction of vertical gradient of soil water content was consistent among the four vegetation types, with the soil water content decreasing as the depth of soil increased. However, the depth of water uptake from soil was discrepant. In *T. aestivum*/*Z. mays* fields, the main depth was between 45–100 cm. In *T. triandra* and *J. regia* fields, the main soil depth was between 100–150 cm. In *V. negundo* fields, the main soil depth was between 150–180 cm. These results may be due to differences in root distribution. *T. aestivum*/*Z. mays* and *T. triandra* are from Gramineae family, and their root systems are distributed in shallow soil. Although *J. regia* is arboreal, it has shallow-rooted plants. *V. exnegundo* has lateral roots radiating out from the main root crown, one or more deeply penetrating tap (sinker) roots, and can uptake water from deep soil. This indicated that *V. exnegundo* was the species with the greatest water consumption. The pattern of plant water consumption needs to be considered in plant species selection, ecological management, and restoration of semi-arid ecosystems in the Taihang Mountain region.

Keywords: Taihang Mountain; Lysimeter measure; Soil water content; Root distribution; Vegetation type

土壤水分是陆地水资源的重要组成部分，也是地表水文过程的重要影响因子[1-2]，在干旱半干旱地区植被恢复、群落演替过程中发挥着重要作用[3]。受物种种类、生长模式和环境条件的影响，植物对水资源获取具有高度时空变异性[4-9]。受水资源空间分布特征变化的影响，土壤水分正逐渐成为植被唯一可利用的有效水资源[10]，了解植被对土壤水分的获取模式对植被的配置与生态系统的管理和修复具有重要意义。

降雨是土壤水分的主要来源。受气候条件的影响，在干旱与半干旱地区降雨时空分布不均匀，具有较高的变异性[11-12]。因此在高强度降雨变异模式下，植物能够根据土壤水分状况调整水分利用策略对于变化环境中的生存是极其重要的[13-14]。一个健康的植物-土壤系统要求植物对水分的利用不超过土壤水分的供应，否则会导致土壤水分的亏缺[15]。多种研究已经证明，植被耗水状况在不同物种和不同季节间有所差异[16-19]。草本和禾本科植物在生长季更倾向于利用浅层土壤水分[1,20-21]，相比较而言，乔木和灌木类植物在生长季更多地利用深层土壤水分[22-23]。在干旱季节，植物主要应用深层土壤水分，在湿润季节，植被水分获取来源主要位于浅土层[1,24]。植被在干湿季节对水分获取来源的转变反映了其对环境的适应能力，这对该植被在生态系统内的生长与分布具有重要意义。

太行山是华北平原重要的水源补给区、京津冀地区重要的生态屏障和国家京津冀协同发展战略的水源涵养功能区。长期以来由于乱砍乱伐、陡坡开荒和过度放牧，导致该地区水土流失严重[25]。为了恢复退化的生态系统，自 1986 年我国实施太行山绿化工程以来，通过封山育林、人工造林和飞播造林等措施增加森林覆盖面积，但由于植被恢复在很大程度上取决于土壤水分的时空分布状态[26-27]，不适宜的造林方式会导致土壤水分条件恶化，加剧土壤水分亏缺状况[28-29]。因此确认不同植被的水分获取模式是实施区域植被恢复的关键。

确认植物对土壤水分获取模式的方法有很多，包括根系系统挖掘、树干液流技术、同位素示踪技术等[30-32]，这些方法都能够在一定程度上确认植被对土壤水分的获取模式，但在本研究中，我们利用

大型称重式蒸渗仪，基于水量平衡原理对水文过程中各要素包括降雨、土壤水分、深层渗漏以及植被蒸散发过程进行连续观测，更全面地探究植被对水资源的获取状况。尽管之前已对不同植被在不同季节的土壤水分变化特征进行了研究，但这些研究一方面采样的土层较浅，另一方面观测植被大多集中于单一类型植被如乔木、灌木或者草本，缺乏对不同类型之间土壤水分变化的研究。本研究选取太行山区 4 种典型植被类型——小麦(*Triticum aestivum*)/玉米(*Zea mays*)(作物)、黄背草(*Themeda triandra*，草本)、荆条(*Vitex negundo*，灌木)和核桃(*Juglans regia*，乔木)，利用大型称重式蒸渗仪，对 0~200 cm 土层深度土壤水分进行连续两年(2018—2019 年)定位观测，分析了不同季节、不同土层深度上土壤水分的变化过程。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

本研究在中国科学院太行山山地生态系统试验站内进行(114°15′50″E，37°52′44″N)，试验站所处小流域海拔高度在 350 m 左右，属于低山丘陵区，坡度 10°~45°，受半干旱大陆性季风型气候影响，多年平均降雨量和多年平均气温分别为 560 mm 和 13 ℃，多年平均蒸发量为 1 600 mm[33]，80%的降雨集中在 6—8 月份，降雨量年际变化较大。对于大多数植物来说，生长季在 4 月初开始，10 月初结束。春季和夏季初期降雨量较少，更易遭受干旱。研究区土壤主要为由花岗片麻岩成土母质发育而成的山地褐土，土层薄，有机质含量低。太行山区历史上为以油松(*Pinus tabuliformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)为主的森林生态系统[25]。受人类活动干扰，植被退化严重，现为以乔灌草为主的农林复合生态系统。植被类型主要为次生低矮乔木刺槐(*Robinia pseudoacacia*)，灌木荆条和酸枣(*Ziziphus jujuba* var. *spinose*)，草本有黄背草和白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)，人工经济林有核桃、石榴(*Punica granatum*)，作物主要为小麦和玉米[34]。

研究区 2018 年和 2019 年降雨量分别为 381.81 mm 和 395.48 mm，较多年平均降雨量(1987—2019 年)低 26.53%和 23.90%，属于降雨量较少年份；相较于 2017 年降雨量分别减少 22.30%和 19.62%。生长季内降雨量分别为 373.38 mm 和 382.28 mm，占全年降雨量的 97.87%和 96.66%。2018 年和 2019 年最大月降雨量分别为 163.83 mm (8 月)和 100.07 mm (8 月)，占生长季降雨量的 43.88%和 26.18%。2018 年和 2019 年降雨量年内分布状况与多年平均降雨量有所差异(图 1)，2018 年降雨量较为集中，表现为 8 月份降雨量的第 1 峰值和 4、5 月份降雨量的第 2 峰值；2019 年降雨量分布较为均匀，4 月、7 月、8 月和 10 月降雨量均相对较多。2018 年和 2019 年月平均气温相似且变化趋势一致。

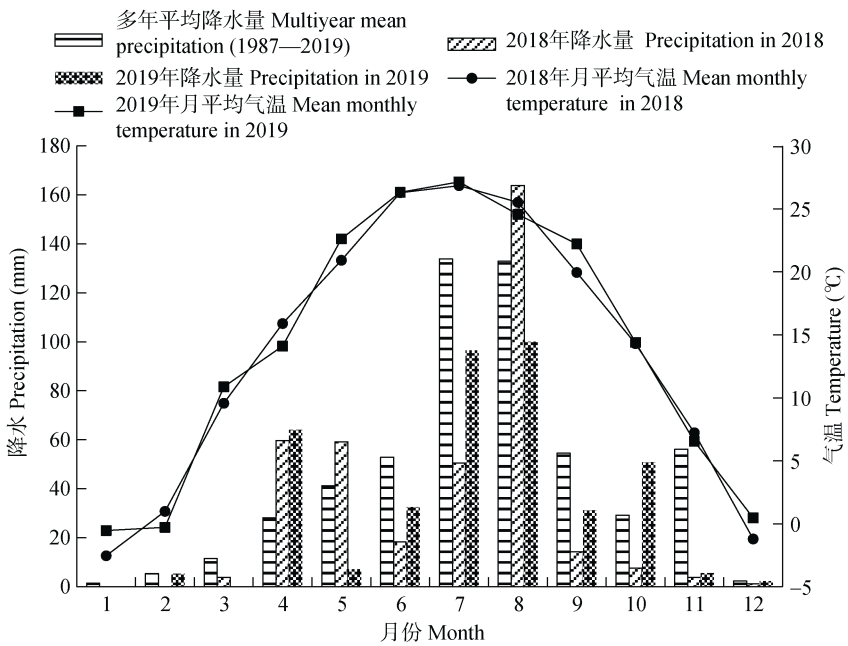

图 1 多年平均降雨(1987—2019 年)及 2018 年和 2019 年月降雨与气温分布图

Fig. 1 Monthly variation of multi-year precipitation (1987–2019), and temperature and precipitation in 2018 and 2019

1.2 研究方法

1.2.1 试验装置

本研究所用设备为大型称重式蒸渗仪(LYSI-DS, 北京时域科技有限公司), 每台蒸渗仪蒸发面积为 2 m×2 m, 土柱深度为 2.3 m (包括 2.0 m 土层和 0.3 m 渗漏层)。在土体 5 cm、15 cm、45 cm、100 cm、150 cm 和 180 cm 处安装土壤水分传感器(CS610, 北京天诺基业科技有限公司), 测量精度为±2.5%(干土)和 0.6%(饱和土), 观测期为 2018—2019 年。蒸渗仪内的土壤为均质回填土壤, 沙粒(2~0.02 mm)、粉粒(0.02~0.002 mm)和黏粒(<0.002 mm)所占比例分别为 56.00%±0.2%、42.28%±1.5%和 1.72%±2.3%, 土壤容重为(1.33±0.07) $g\cdot cm^{-3}$, 饱和导水率和田间持水量分别为(53.21±3.12) $cm\cdot d^{-1}$ 和 41.76%±2.78%, 地下渗流由翻斗式流量计测得, 每斗为 5 mL, 测量间隔为 1 h, 渗漏量为 1 h 内数据。研究区东侧 20 m 处建有标准气象观测场(AR5 Automatic Weather Station, Avolon Scientific, USA), 能够对研究区降雨量和温度等气象要素进行连续观测。

1.2.2 试验设计与数据采集

称重式蒸渗仪共 4 台, 于 2017 年 10 月选择生长状况良好的黄背草、荆条和核桃带原状土移植入蒸渗仪内, 小麦/玉米的种植与大田同步, 荆条和黄背草观测期间无人工管理, 小麦/玉米除在播种和收获期外, 其余时间无人工管理, 核桃种植区除进行杂草清理外, 无其余人工管理。4 种植被类型生长状况如表 1 所示:

为避免移植初期土壤理化性质和植被生长状况对试验结果产生影响, 本研究所用数据为 2018 年和 2019 年生长季(4—10 月)内数据, 土壤含水量数据和气象数据均于每月月底采集, 土壤水分为 1 h 内平均值, 降雨量数据为 1 h 内累计值。

表 1　蒸渗仪内植被生长状况

Table 1　Vegetative growth status in the lysimeter

年份 Year	植被种类 Type of vegetation	盖度 Cover degree (%)	株高 Plant height (cm)	茎秆直径 Stem diameter (cm)
2018	小麦 *Triticum aestivum*	95	40	—
	玉米 *Zea mays*	85	180	—
	黄背草 *Themeda japonica*	90	50	—
	荆条 *Vitex negundo*	85	70	1.3±0.35
	核桃 *Juglans regia*	50	230	4.1
2019	小麦 *Triticum aestivum*	93	35	—
	玉米 *Zea mays*	83	165	—
	黄背草 *Themeda japonica*	90	52	—
	荆条 *Vitex negundo*	87	65	1.32±0.40
	核桃 *Juglans regia*	50	235	4.2

1.2.3 数据分析方法

1.2.3.1 土壤储水量

土壤储水量(SWS, mm)为一定厚度土壤中所含的水量。土壤储水量与降雨、土壤蒸发和植被蒸腾等因素有关, 是影响植被生长的主要因素, 分析不同植被条件下土壤储水量对于太行山区植被恢复具有重要意义, 其计算公式为[35]:

$$\mathrm{SWS}=\sum_{i=1}^{n}\left(\theta_i\times h_i\right) \tag{1}$$

式中: θ_i 为第 i 层(共 n 层)土壤的体积含水率($cm^3\cdot cm^{-3}$), h_i 为第 i 层土壤的厚度(mm)。

1.2.3.2 土壤水分亏缺度

土壤水分亏缺度(D, %)表示土壤水分对植被生长的亏缺程度, 当土壤水分亏缺度较大时, 会使生物产量下降, 严重时甚至会导致生物死亡。土壤水分亏缺度计算公式为[36]:

$$D=\frac{D_{\mathrm{a}}}{F}\times 100\% \tag{2}$$

$$D_{\mathrm{a}}=F-\mathrm{SWS} \tag{3}$$

式中: D_{a} 为水分亏缺量, mm; F 为田间持水量, mm。$D>0$ 表示水分亏缺, $D<0$ 表示水分亏缺得到改善。

本研究使用 Excel 2010 进行数据整理, 利用 SPSS 17.0 进行统计分析, 图形绘制使用 Origin 8.0。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型土壤含水量变化

由表 2 可知, 2018—2019 年, 各植被类型土壤含水量均有所降低, 2018 年 4 种植被类型土壤含水量核桃>黄背草>荆条>小麦/玉米, 2019 年土壤含水量则为核桃>小麦/玉米>黄背草>荆条。

表 2 2018 年和 2019 年研究区不同植被类型 0~200 cm 土层年平均土壤含水量

Table 2 Average annual soil water content in 0–200 cm soil layer under different vegetation covers in the study area in 2018 and 2019 $cm^3 \cdot cm^{-3}$

年份 Year	小麦/玉米 *Triticum aestivum / Zea mays*	黄背草 *Themeda japonica*	荆条 *Vitex negundo*	核桃 *Juglans regia*
2018	0.30	0.35	0.32	0.36
2019	0.28	0.26	0.23	0.31

由表 3 可知, 在小麦/玉米种植区, 5 cm 和 15 cm 深度上土壤含水量两年间无变化, 在 45 cm、100 cm、150 cm 和 180 cm 土层深度上土壤含水量 2019 年比 2018 年分别下降 0.03 $cm^3 \cdot cm^{-3}$、0.03 $cm^3 \cdot cm^{-3}$、0.02 $cm^3 \cdot cm^{-3}$ 和 0.02 $cm^3 \cdot cm^{-3}$, 与其他土层深度相比, 45 cm 和 100 cm 深度上土壤含水量降低较多; 在黄背草种植区, 6 个深度上土壤含水量 2019 年比 2018 年均有所下降, 其中以 100 cm 和 150 cm 深度上土壤含水量下降幅度最大, 分别为 0.13 $cm^3 \cdot cm^{-3}$ 和 0.12 $cm^3 \cdot cm^{-3}$; 在荆条种植区, 5 cm 和 15 cm 深度土壤含水量 2019 年比 2018 年分别上升 0.01 $cm^3 \cdot cm^{-3}$ 和 0.02 $cm^3 \cdot cm^{-3}$, 150 cm 和 180 cm 深度上土壤含水量较其他深度下降幅度更大, 分别为 0.09 $cm^3 \cdot cm^{-3}$ 和 0.10 $cm^3 \cdot cm^{-3}$, 在核桃种植区, 除 5 cm 深度外, 其他各深度土壤含水量均有所降低, 其中以 100 cm 和 150 cm 深度上土壤含水量下降幅度最大, 分别为 0.07 $cm^3 \cdot cm^{-3}$ 和 0.08 $cm^3 \cdot cm^{-3}$。综上可知, 从 2018 年到 2019 年, 黄背草种植区土壤含水量下降幅度最大, 作物种植区下降幅度最小。在不同植被类型下, 土壤含水量最大下降幅度所处土壤深度也有所差异, 在作物种植区, 为 45~100 cm, 在黄背草和核桃种植区, 为 100~150 cm, 在荆条种植区, 为 150~180 cm。

表 3 2018 和 2019 年 4 种植被类型各土层深度土壤含水量变化

Table 3 Soil moisture content and variation in depth of each soil layer in different plots of 2018 and 2019

年份 Year	土层深度 Soil depth (cm)	土壤含水量 Soil water content ($cm^3 \cdot cm^{-3}$)			
		小麦/玉米 *Triticum aestivum / Zea mays*	黄背草 *Themeda japonica*	荆条 *Vitex negundo*	核桃 *Juglans regia*
2018	5	0.24	0.24	0.18	0.19
2019		0.24	0.21	0.19	0.19
2018	15	0.20	0.26	0.17	0.28
2019		0.20	0.23	0.19	0.25
2018	45	0.25	0.32	0.26	0.37
2019		0.22	0.22	0.21	0.32
2018	100	0.31	0.38	0.29	0.40
2019		0.28	0.25	0.24	0.33
2018	150	0.36	0.45	0.34	0.46
2019		0.34	0.33	0.25	0.38
2018	180	0.43	0.45	0.33	0.45
2019		0.41	0.36	0.23	0.39

由图 2 可知, 2018 年和 2019 年各植被类型土壤含水量变化趋势较为一致。在 5 cm 和 15 cm 深度上, 土壤含水量受降雨-入渗和蒸散发影响波动剧烈; 在 45 cm 深度上, 仅在遭遇强降雨后土壤含水量会明显上升(例如: 2018 年 8 月 8 日, 日降雨量 47.75 mm; 2019 年 8 月 4 日, 日降雨量 72.64 mm); 在 100 cm 深度上, 除荆条外, 其余 3 种植被类型在遭遇连续强降雨时(2019 年 8 月 4—9 日, 总降雨量 91.95 mm), 土壤含水量均有所上升, 但土壤含水量上升趋势有所差异, 在降雨前, 小麦/玉米、黄背草和核桃 100 cm 土层深度土壤含水量分别为 0.38 $cm^3 \cdot cm^{-3}$、0.22 $cm^3 \cdot cm^{-3}$ 和 0.25 $cm^3 \cdot cm^{-3}$, 降雨后 3 种植被土壤含水量上升幅度分别为 0.04 $cm^3 \cdot cm^{-3}$、0.01 $cm^3 \cdot cm^{-3}$ 和 0.10 $cm^3 \cdot cm^{-3}$, 分别在降雨开始后 11 h、69 h 和 35 h 土壤含水量开始上升。由此可知, 小麦/玉米种植区的入渗速率最快, 核桃种植区土壤含水量上升幅度最大。形成这一结果的原因可能是小麦/玉米种植区在耕作作用下, 土壤孔隙度更多, 土壤疏松, 有利于水分下渗; 在核桃种植区, 由于植被盖度相比其他植被小, 冠层对降雨的截留作用更小, 因此

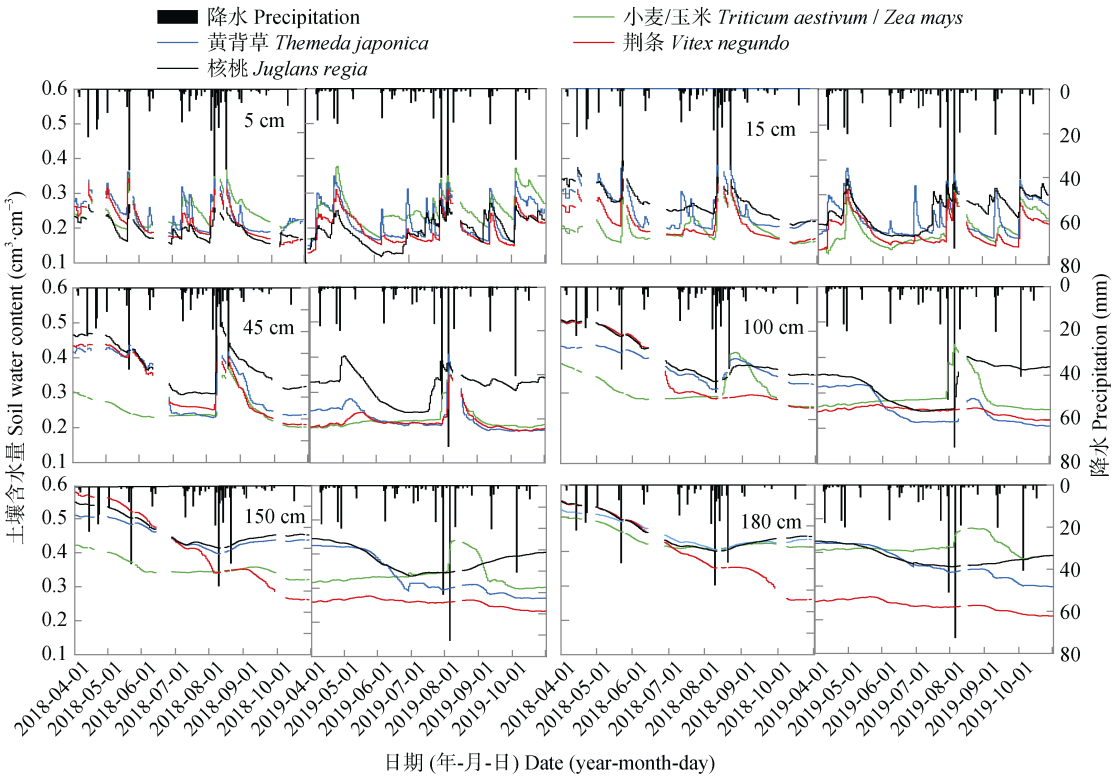

图 2　2018 年和 2019 年生长季(4—10 月)不同植被覆盖条件下土壤含水量季节变化

Fig. 2　Seasonal variations of soil water contents under different vegetation covers in the growth seasons (April–October) of 2018 and 2019

有更多的降雨转化为了土壤水分；在荆条种植区，降雨前土壤含水量为 0.25 $cm^3 \cdot cm^{-3}$，较黄背草种植区土壤含水量高，但该土层深度降雨后土壤含水量无上升，出现这种情况的原因是荆条种植区上层土壤含水量较低，在 5 cm、15 cm 和 45 cm 土层深度上土壤含水量均为 0.23 $cm^3 \cdot cm^{-3}$。由上可知，某一土层深度土壤含水量对降雨的响应过程受该土层深度含水量和其上层土壤含水量的影响。在 150 cm 和 180 cm 土层深度上，仅在作物种植区遭遇强降雨时土壤含水量有所上升，其他 3 种植被类型种植区土壤含水量基本保持不变，形成这一结果的原因可能是浅层土壤含水量的差异，在 2019 年 8 月 3 日，4 种植被类型中，5 cm 土层深度上作物种植区土壤含水量为 0.28 $cm^3 \cdot cm^{-3}$，明显高于其他 3 种植被，而在 15 cm、45 cm 和 100 cm 土层深度上，土壤含水量分别为 0.25 $cm^3 \cdot cm^{-3}$、0.29 $cm^3 \cdot cm^{-3}$ 和 0.39 $cm^3 \cdot cm^{-3}$，高于黄背草和荆条种植区，虽在 15 cm 和 45 cm 土层深度上较核桃种植区土壤含水量略低，但是在 100 cm 土层深度上明显高于核桃种植区。由此可知，表层土壤含水量对于降雨入渗过程具有重要影响。

2.2　不同植被类型土壤储水量状况

由图 3 可知，2018 年生长季 4 种植被类型土壤储水量整体呈下降趋势，在黄背草、荆条和核桃种植区，4—7 月土壤储水量迅速下降，8 月受降雨量补充，土壤储水量有所上升，9、10 月，由于降雨量较少和植被对土壤水分的消耗，土壤储水量呈下降趋势，其中，黄背草种植区和核桃种植区月土壤储水量相近且变化趋势一致，而荆条种植区，4—6 月与黄背草和核桃土壤储水量相近，6 月之后土壤储水量下降幅度增加，表明此时荆条比黄背草和核桃蒸散发作用强烈，对土壤水分消耗量增大。在小麦/玉米种植区，4—6 月土壤储水量呈下降趋势，6—8 月土壤储水量有所上升，但上升幅度较小，8—9 月土壤储水量基本保持不变，9—10 月 土壤储水量有明显下降趋势。与其他植被类型相比，小麦/玉米种植区 6—7 月土壤储水量上升的原因可能是小麦在 6 月进行收割，6—7 月无植被对土壤水分的消耗，降雨除用于浅层土壤蒸发作用外，其余均转化为土壤水分，因此土壤储水量有所上升，9—10 月是玉米生长旺盛时期，蒸散发作用强烈，对水分的消耗量大，因此土壤储水量呈明显下降趋势。2019 年生长季，4 种植被类型土壤储水量整体均无明显下降趋势，但各月土壤储水量由于降雨分布状况及不同植被类型下蒸散发作用的差异而有所不同。小麦/玉米种植区，除 6—7 月土壤储水量有轻微上升外，其他月份土壤储水量基本保持稳定；在黄背草种植区，4—8 月土壤

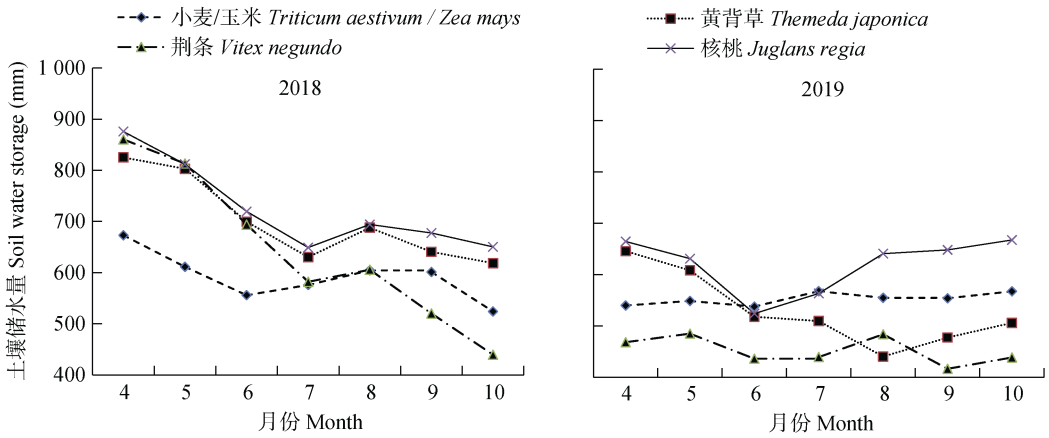

图 3 2018 年和 2019 年生长季不同植被类型 0~180 cm 土层土壤储水量变化

Fig. 3 Change characteristics of soil water storage in 0–180 cm soil layer under different vegetation covers in the growth seasons of 2018 and 2019

储水量呈持续下降趋势, 8—10 月受降雨的补充作用土壤储水量有所上升; 在荆条种植区, 除 5—6 月和 7—9 月土壤储水量变化较为明显外, 其他月份土壤储水量基本保持稳定; 在核桃种植区, 4—6 月土壤储水量呈迅速下降趋势, 6—8 月由于降雨补充, 土壤储水量快速回升并保持在较高水平。

2.3 不同植被类型土壤水分亏缺状况

已有研究表明, 在 0~60 cm 土层为荆条根系主要分布区[37]; 冬小麦根长密度和根质量密度在 0~50 cm 土层内分别占 57.7%和 66.7%[38]; 0~60 cm 土层为玉米根系生长活跃区[39], 多年生(5—8 年)核桃根系主要分布在 10~60 cm 土层内[40]; 对试验站内自然生长状态下黄背草根系进行挖掘, 发现根系主要分布在 0~60 cm 土层范围内。基于已有研究, 本研究将整个研究土层剖面分为 0~72.5 cm 的根系主要分布区和 72.5~200 cm 深度的根系次要分布区。如图 4 所示, 2018 年 4—7 月, 0~72.5 cm 土层深度黄背草、荆条和核桃覆盖条件下土壤水分亏缺度呈上升趋势; 小麦覆盖条件下土壤水分亏缺度呈先上升后下降趋势, 在 6 月份土壤水分亏缺度达到最大值。8 月份, 各植被覆盖条件下土壤水分亏缺度均迅速降低, 在 9 月和 10 月又迅速上升。在 72.5~100 cm

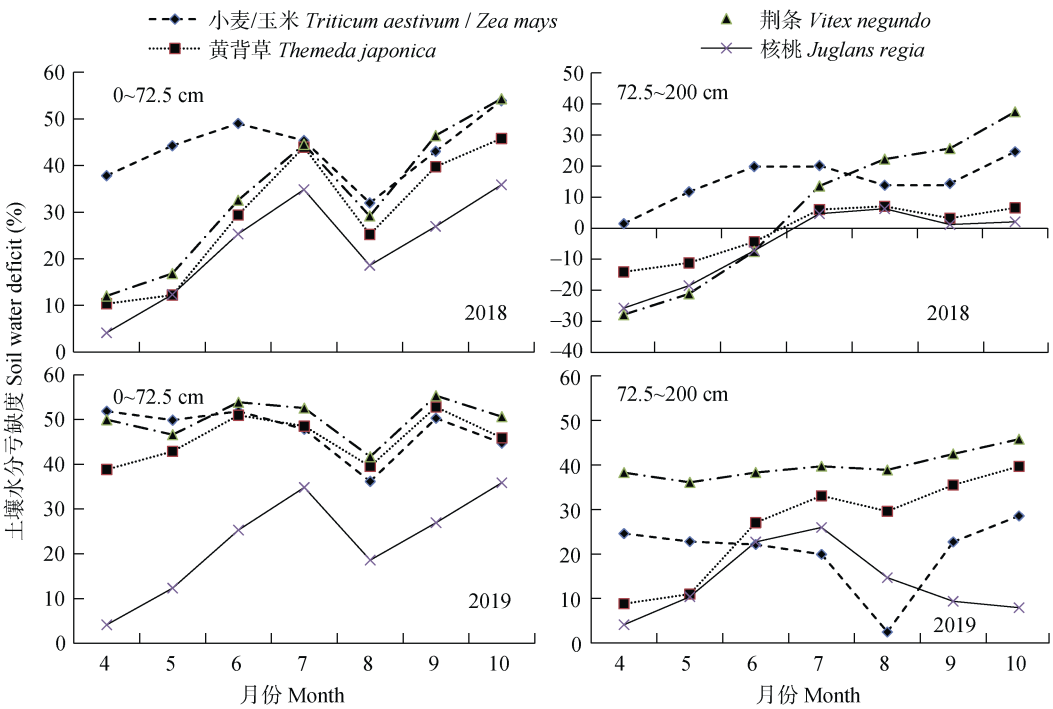

图 4 2018 年和 2019 年生长季不同植被类型 0~72.5 cm 和 72.5~200 cm 土层土壤水分亏缺度

Fig. 4 Variation of soil water deficit of the soil depths of 0–72.5 cm and 72.5–200 cm under different vegetation covers in the growth seasons of 2018 and 2019

土层深度上, 4 台蒸渗仪内土壤水分亏缺状况均呈连续上升趋势, 其中作物覆盖条件下土壤水分亏缺度增长量较小, 荆条覆盖条件下土壤水分亏缺度增长量最大。总体来说各植被覆盖条件下土壤水分亏缺关系为: 小麦/玉米>荆条>黄背草>核桃。2019 年 4—7 月, 在 0~72.5 cm 土层深度小麦/玉米、黄背草和荆条覆盖条件下土壤水分亏缺状况保持稳定, 而核桃覆盖条件下土壤水分亏缺度呈上升趋势; 8 月, 土壤水分亏缺度与 2018 年变化趋势一致, 但 9 月和 10 月, 小麦/玉米、黄背草和荆条覆盖条件下土壤水分亏缺度呈先上升后下降趋势, 而核桃覆盖条件下土壤水分亏缺度呈连续上升趋势。在 72.5~200 cm 土层深度上, 4 台蒸渗仪内土壤水分亏缺状况各不相同, 在小麦/玉米覆盖条件下, 土壤水分亏缺度在 4—7 月和 9—10 月保持稳定, 但在 8 月土壤水分亏缺度迅速下降至接近于 0; 在黄背草覆盖条件下, 从 4—10 月, 土壤水分亏缺度呈逐渐上升趋势; 在荆条覆盖条件下, 土壤水分亏缺度始终保持稳定状况; 在核桃覆盖条件下, 土壤水分亏缺度呈单峰曲线, 并在 7 月达到峰值。总体来说, 4 台蒸渗仪内土壤水分库亏缺度大小关系可表示为荆条>黄背草>小麦/玉米>核桃。

3　讨论

3.1　植被对土壤水分变化特征的影响

除气象因素外, 植被自身的属性是影响土壤水分变化的重要因素[41]。根系吸水是土壤水分消耗的主要途径, 这在许多研究中已得到证实[42-45]。本研究中, 2018 年和 2019 年生长季降雨总量基本一致(图 1), 但两个生长季植被蒸散发量相差较大(图 5), 由于蒸散发量的差异, 在 2019 年生长季末, 不同植被覆盖条件下土壤水分亏缺状况差异明显(图 4), 整体表现为核桃覆盖条件下土壤水分亏缺度最小, 这与前人研究结果一致[46]。但荆条覆盖条件下土壤水分亏缺状况最严峻, 这与前人研究有所差异[47-48], 在徐学华等[48]和孙吉定等[47]的研究中, 与其他群落相比, 荆条群落土壤含水量更高, 相比于草地具有更强的水源涵养功能, 荆条根系对土壤水分的获取方式可能是形成差异性结果的原因, 在自然条件下, 太行山区土层薄弱, 风化岩体层发育, 这种岩土二元结构的土壤持水能力差, 因此土壤含水量较低, 而荆条根系具有较强的生态可塑性[8], 当土壤含水量丰富时, 荆条根系可以从周围环境中获取大量水分供给自身生长发育, 当土壤含水量匮乏时, 荆条根系则从土壤中吸收较少水分维持生长存活, 在本研究中也可得出相似结论。

3.2　改善太行山区土壤水分状况的措施

通过分析 2018 年和 2019 年太行山区典型小流域内不同植被条件下土壤水分状况可知, 蒸散发量过高是导致该地区土壤水分亏缺的主要原因, 为了降低该区域的蒸散发量, 我们提出了对荆条灌丛管理利用来缓解该地区土壤水分亏缺状况的措施。

荆条是太行山区分布最为广泛的植被类型, 在未开垦的荒坡均为单一的荆条灌丛群落, 形成这一分布方式的原因是由荆条自身特性决定的, 荆条灌丛根系

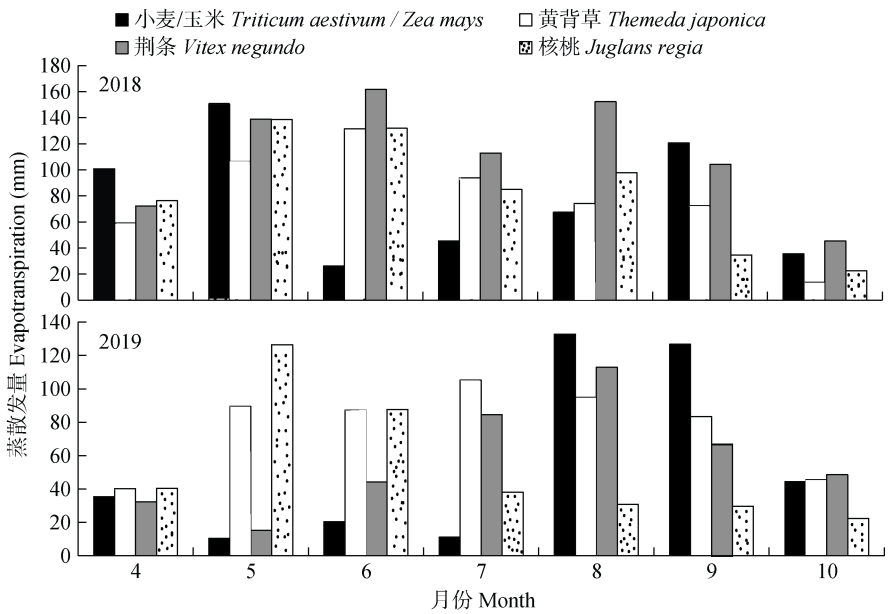

图 5　2018 年和 2019 年生长季不同植被类型蒸散发量分布状况

Fig. 5　Monthly evapotranspiration under different vegetation covers in the growth seasons of 2018 and 2019

分布较深，在浅层土壤水有限的情况下，可以通过根系利用深层土壤水分；荆条灌丛生命力旺盛，在生长季蒸散发量较大，由研究结果可知，荆条灌丛的土壤储水量在 4 种植被中最低，表明对水分的消耗严重，如果不对荆条灌丛加以管理和利用，不仅会加剧该地的土壤水分亏缺状况，也阻碍了当地生态修复进程，基于此，我们提出了一种对荆条灌丛管理与利用的方法(图 6)以改善太行山区土壤水分亏缺状况。

利用荆条灌丛改善土石山区水分亏缺状况的措施，共分为 3 部分。首先，在雨季过后对荆条灌丛进行收割，收集灌丛枝条和地表枯落物进行粉碎作为后续过程中的填充基料，对荆条灌丛进行收割后，在灌丛收割区岩土表层进行机械钻孔，钻孔方式如图 7 和图 8 所示；其次，将粉碎灌丛枝条、枯落物进行孔内回填，并在回填过程中添加自主配制的生物菌剂辅料；再次，对填充有生物材料的钻孔内定时添加水分并在孔隙口覆盖可降解膜，为土壤动物和微生物提供适宜的生存环境，加快填充孔隙内粉碎枝条和枯落物的分解进程。

该措施改善土壤水分状况的原理为，在 9 月下旬对荆条灌丛进行人工收割，灌丛收割位置为距离地表 10~20 cm 处，优选 15 cm，既可发挥灌丛植被在雨季保持水土的功能，又可降低雨季过后荆条对土壤水分的消耗，此外，根系的保存有利于植被萌发生长，在下一年雨季中持续发挥荆条灌丛水土保持功能。雨季过后对灌丛枝条进行收割后，收集灌丛枝条和地表枯落物并粉碎填充到钻孔中，改变自然状态下枯落物水平分布方式为垂向分布方式，减少了干旱季节灌丛及枯落物储存量，降低森林火灾的风险；钻孔及粉碎枝条、枯落物的填充增加了地表凹陷程度，减小了地表径流量，增加土壤水分入渗效率；生物菌剂和水分的添加及覆膜增温能加快

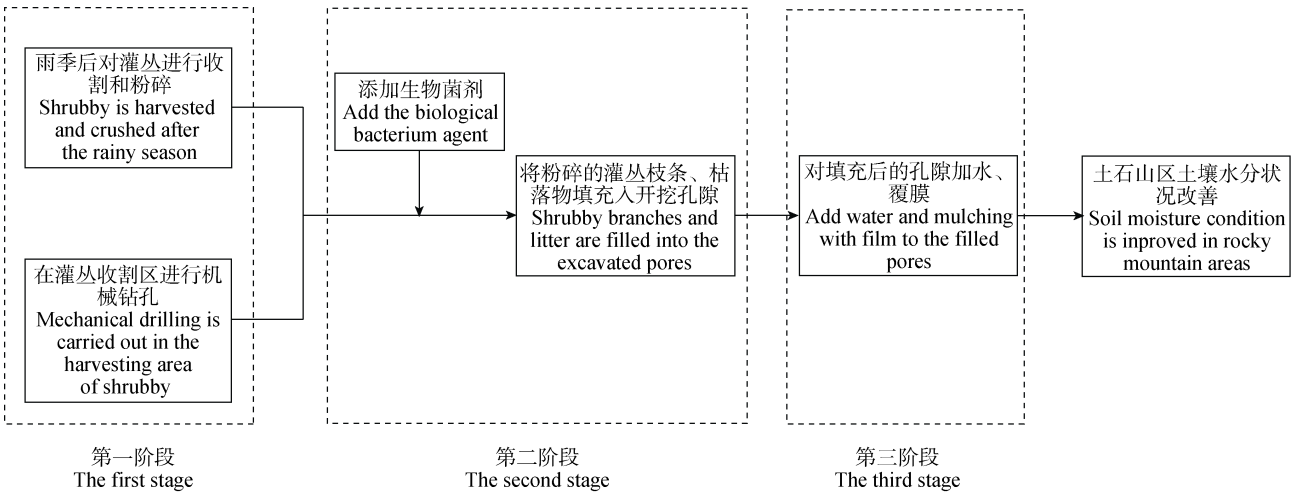

图 6　对荆条灌丛管理与利用以改善区域土壤水分状况的流程图

Fig. 6　Flow chart of measures of management and utilization of *Vitex negundo* to improve water conservation

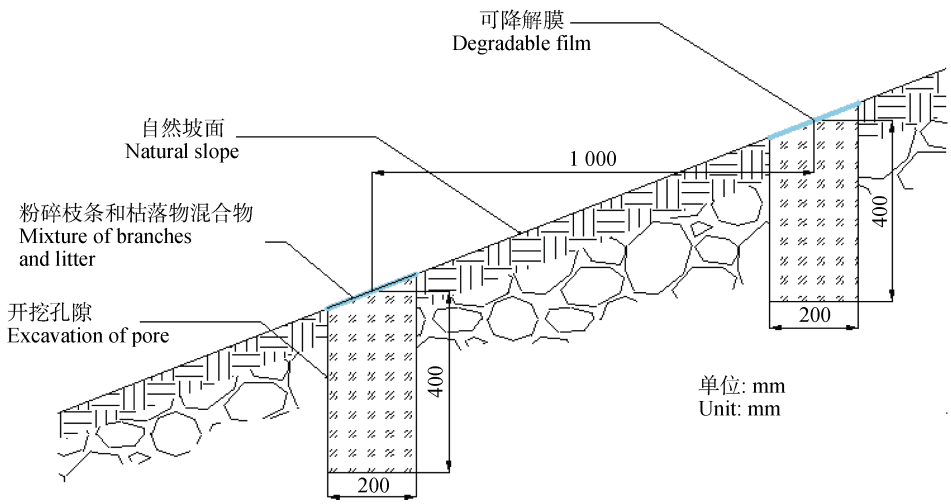

图 7　坡地孔隙开挖剖面图

Fig. 7　Profile of slope pore excavation

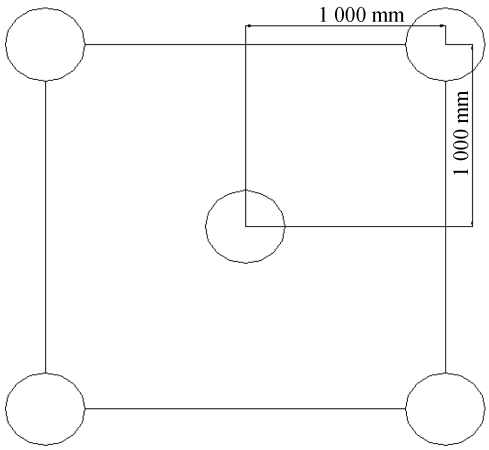

图 8　坡地孔隙开挖方式俯视图
Fig. 8　Vertical view of pore excavation on slope

粉碎枝条、枯落物分解速率, 改善土壤结构, 提高土壤持水能力, 增加土壤肥力。这一措施改变了自然状态下灌丛及枯落物分布的方式, 有利于发挥灌丛植被的生态价值, 降低非雨季蒸腾耗水量, 减小地表径流、增加土壤水分入渗能力, 改善土壤结构, 提高土壤有机质含量, 能够对太行山区土壤水分亏缺状况起到改善作用。

4　结论

本研究围绕太行山区土壤水分亏缺、植被生长状况差等问题, 对不同植被条件下土壤水分变化特征进行分析, 得出以下结论:

1)在初始土壤含水量相近的背景下, 经过 2018 年和 2019 年连续两个干旱年, 核桃土壤含水量最高, 黄背草土壤含水量次之, 农用地(小麦/玉米)深层土壤含水量虽较高, 但整体土壤含水量低于黄背草群落, 荆条群落土壤水分状况最差。

2)不同植被对土壤剖面水分利用状况有所差异, 农用地主要吸收 45~100 cm 土层深度土壤水分, 荆条对 150~180 cm 土层深度土壤水分利用较多, 黄背草对 100~150 cm 土层深度土壤水分的利用多于其他土层, 核桃地中, 除 0~45 cm 土层深度外, 对其余土层水分利用较为均衡。

综上所述, 荆条作为太行山区主要耗水物种, 因其高度的生态可塑性能够在半干旱环境中保持竞争优势, 但不利于区域群落演替。因此应对荆条灌丛进行管理和利用, 改变空间结构, 减小荆条覆盖面积以降低对土壤水分的过度消耗, 提升区域水源涵养功能, 加速生态恢复进程。

参考文献 References

[1] ASBJORNSEN H, SHEPHERD G, HELMERS M, et al. Seasonal patterns in depth of water uptake under contrasting annual and perennial systems in the Corn Belt Region of the Midwestern U.S.[J]. Plant and Soil, 2008, 308(1): 69–92

[2] CHEN L D, HUANG Z L, GONG J, et al. The effect of land cover/vegetation on soil water dynamic in the hilly area of the loess plateau, China[J]. CATENA, 2007, 70(2): 200–208

[3] 崔向慧. 干旱半干旱沙区人工植被与土壤水分环境相互作用关系研究进展[J]. 世界林业研究, 2010, 23(6): 50–54
CUI X H. Research advances in the interaction relationships between artificial vegetations and soil moisture in arid and semi-arid sandy regions of China[J]. World Forestry Research, 2010, 23(6): 50–54

[4] DAWSON T E, MAMBELLI S, PLAMBOECK A H, et al. Stable isotopes in plant ecology[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 2002, 33(1): 507–559

[5] EGGEMEYER K D, AWADA T, HARVEY F E, et al. Seasonal changes in depth of water uptake for encroaching trees *Juniperus virginiana* and *Pinus ponderosa* and two dominant C_4 grasses in a semiarid grassland[J]. Tree Physiology, 2009, 29(2): 157–169

[6] EVARISTO J, MCDONNELL J J, CLEMENS J. Plant source water apportionment using stable isotopes: A comparison of simple linear, two-compartment mixing model approaches[J]. Hydrological Processes, 2017, 31(21): 3750–3758

[7] GROSSIORD C, SEVANTO S, DAWSON T E, et al. Warming combined with more extreme precipitation regimes modifies the water sources used by trees[J]. New Phytologist, 2017, 213(2): 584–596

[8] WANG J, FU B J, LU N, et al. Seasonal variation in water uptake patterns of three plant species based on stable isotopes in the semi-arid Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2017, 609: 27–37

[9] YANG B, WEN X F, SUN X M. Seasonal variations in depth of water uptake for a subtropical coniferous plantation subjected to drought in an East Asian monsoon region[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 201: 218–228

[10] 杨磊, 卫伟, 陈利顶, 等. 半干旱黄土丘陵区人工植被深层土壤干化效应[J]. 地理研究, 2012, 31(1): 71–81
YANG L, WEI W, CHEN L D, et al. Soil desiccation in deep soil layers under different vegetation types in the semi-arid loess hilly region[J]. Geographical Research, 2012, 31(1): 71–81

[11] 冉津江. 我国干旱半干旱区温度和降水的时空分布特征[D]. 兰州: 兰州大学, 2014
RAN J J. The spatial and temporal characteristics of temperature and precipitation in arid and semi-arid regions of China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014

[12] 张军涛, 李哲. 近45年来中温带半湿润-半干旱区水分条件的时空分布格局[C]. 全球变化的区域响应与自然地理学创新学术研讨会, 2007
ZHANG J T, LI Z. The spatial and temporal distribution pattern of moisture conditions in the semi-humid to semi-arid temperate zone in recent 45 years[C]. Symposium on Regional Response to Global Change and Physical Geography Innovation. 2007

[13] EWE S M L, DA S. L, STERNBERG L, et al. Seasonal plant

water uptake patterns in the saline southeast Everglades ecotone[J]. Oecologia, 2007, 152(4): 607–616

[14] SHARON M L, EWE, LEONEL DA S L S. Water uptake patterns of an invasive exotic plant in coastal saline habitats[J]. Journal of Coastal Research, 2007, 2007(231): 255–264

[15] CHEN Y P, WANG K B, LIN Y S, et al. Balancing green and grain trade[J]. Nature Geoscience, 2015, 8(10): 739–741

[16] BUSCH D E, SMITH S D. Mechanisms associated with decline of woody species in riparian ecosystems of the southwestern U.S.[J]. Ecological Monographs, 1995, 65(3): 347–370

[17] JACKSON P C, CAVELIER J, GOLDSTEIN G, et al. Partitioning of water resources among plants of a lowland tropical forest[J]. Oecologia, 1995, 101(2): 197–203

[18] LE ROUX X, BARIAC T, MARIOTTI A. Spatial partitioning of the soil water resource between grass and shrub components in a West African humid savanna[J]. Oecologia, 1995, 104(2): 147–155

[19] STRATTON L C, GOLDSTEIN G, MEINZER F C. Temporal and spatial partitioning of water resources among eight woody species in a Hawaiian dry forest[J]. Oecologia, 2000, 124(3): 309–317

[20] PRECHSL U E, BURRI S, GILGEN A K, et al. No shift to a deeper water uptake depth in response to summer drought of two lowland and sub-alpine C_3-grasslands in Switzerland[J]. Oecologia, 2015, 177(1): 97–111

[21] PRIYADARSHINI K V R, PRINS H H T, DE BIE S, et al. Seasonality of hydraulic redistribution by trees to grasses and changes in their water-source use that change tree-grass interactions[J]. Ecohydrology, 2016, 9(2): 218–228

[22] MCCOLE A A, STERN L A. Seasonal water use patterns of *Juniperus ashei* on the Edwards Plateau, Texas, based on stable isotopes in water[J]. Journal of Hydrology, 2007, 342(3/4): 238–248

[23] WU H W, LI X Y, JIANG Z Y, et al. Contrasting water use pattern of introduced and native plants in an alpine desert ecosystem, Northeast Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 542: 182–191

[24] DAWSON T E, PATE J S. Seasonal water uptake and movement in root systems of Australian phraeatophytic plants of dimorphic root morphology: a stable isotope investigation[J]. Oecologia, 1996, 107(1): 13–20

[25] 刘洪升. 明清滥伐森林对海河流域生态环境的影响[J]. 河北学刊, 2005, 25(5): 134–138
LIU H S. Influence of denudation forest to the ecological environment of the Haihe River valley in the Ming&Qing[J]. Hebei Academic Journal, 2005, 25(5): 134–138

[26] FENG X M, FU B J, PIAO S L, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits[J]. Nature Climate Change, 2016, 6(11): 1019–1022

[27] MENGISTU D K. The influence of soil water deficit imposed during various developmental phases on physiological processes of tef (*Eragrostis tef*)[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, 132(3/4): 283–289

[28] SONG L N, ZHU J J, LI M C, et al. Water utilization of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in a sparse wood grassland in the semiarid sandy region of Northeast China[J]. Trees, 2014, 28(4): 971–982

[29] 赵景波, 李瑜琴. 陕西黄土高原土壤干层对植树造林的影响[J]. 中国沙漠, 2005, 25(3): 370–373
ZHAO J B, LI Y Q. Effects of soil-drying layer on afforestation in the loess plateau of Shaanxi[J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(3): 370–373

[30] DELZON S, LOUSTAU D. Age-related decline in stand water use: sap flow and transpiration in a pine forest chronosequence[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 129(3/4): 105–119

[31] XU H, LI Y. Water-use strategy of three central Asian desert shrubs and their responses to rain pulse events[J]. Plant and Soil, 2006, 285(1): 5–17

[32] ZHANG Z Q, EVARISTO J, LI Z, et al. Tritium analysis shows apple trees may be transpiring water several decades old[J]. Hydrological Processes, 2017, 31(5): 1196–1201

[33] 肖登攀, 韩淑敏, 杨艳敏, 等. 太行山低山丘陵区不同地表类型降雨入渗产流规律研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(5): 35–39
XIAO D P, HAN S M, YANG Y M, et al. Study on rainfall-infiltration-runoff under typical ground surfaces conditions in the hilly regions of Taihang Mountain[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(5): 35–39

[34] LIU X P, ZHANG W J, ZHANG B, et al. Diurnal variation in soil respiration under different land uses on Taihang Mountain, North China[J]. Atmospheric Environment, 2016, 125: 283–392

[35] 韩晓阳, 刘文兆, 程立平. 黄土塬区深剖面土壤水分垂直分布特征及其时间稳定性[J]. 应用生态学报, 2017, 28(2): 430–438
HAN X Y, LIU W Z, CHENG L P. Vertical distribution characteristics and temporal stability of soil water in deep profile on the Loess Tableland, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(2): 430–438

[36] 银敏华, 李援农, 张天乐, 等. 集雨模式对农田土壤水热状况与水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 194–203
YIN M H, LI Y N, ZHANG T L, et al. Effects of different rainwater harvesting patterns on soil hydrothermal regimes and water use efficiency of summer maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 194–203

[37] 韩烈保, 王琼, 王晓蓓, 等. 不同立地条件下荆条根系分布规律[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(2): 231–237
HAN L B, WANG Q, WANG X B, et al. Researches on root distribution of *Vitex negundo* var. *heterophylla* (Franch.) Rehd. on different sites conditions[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2009, 17(2): 231–237

[38] 刘荣花, 朱自玺, 方文松, 等. 冬小麦根系分布规律[J]. 生态学杂志, 2008, 27(11): 2024–2027
LIU R H, ZHU Z X, FANG W S, et al. Distribution pattern of winter wheat root system[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(11): 2024–2027

[39] 廖荣伟, 刘晶淼, 白月明, 等. 玉米生长后期的根系分布研

究[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(3): 284–291
LIAO R W, LIU J M, BAI Y M, et al. Spatial distribution and temporal variation of maize root in the soil under field conditions[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(3): 284–291

[40] 马长明, 翟明普, 刘春鹏. 单作与间作条件下核桃根系分布特征研究[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(6): 181–186
MA C M, ZHAI M P, LIU C P. Root distribution characteristics of Juglans regia in monoculture and intercropping[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009, 31(6): 181–186

[41] 唐敏. 黄土丘陵区坡地土壤水热特征及其耦合效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019
TANG M. Characteristics of soil moisture and temperature and their coupling effects on sloping land in loess hilly regin[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019

[42] 杨永辉, 王志平, 佐仓保夫, 等. 全球变暖对太行山植被生产力及土壤水分的影响[J]. 应用生态学报, 2002(6): 667–671
YANG Y H, WANG Z P, SAKURA Y, et al. Effects of global warming on productivity and soil moisture in Taihang Mountain: a transplant study[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002(6): 667–671

[43] 何春霞, 张劲松, 孟平, 等. 太行山南麓 3 种常见灌木的水分利用特性[J]. 林业科学, 2018, 54(9): 137–146
HE C X, ZHANG J S, MENG P, et al. Water use strategies of three native shrubs in the southern Taihang Mountain[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2018, 54(9): 137–146

[44] 田恬, 宋献方, 杨丽虎, 等. 太行山丘陵区降水时空分布特征及影响因素分析——以崇陵流域为例[J]. 资源科学, 2016, 38(6): 1192–1202
TIAN T, SONG X F, YANG L H, et al. Spatial-temporal variation and factors affecting precipitation in the hilly area of Taihang Mountain[J]. Resources Science, 2016, 38(6): 1192–1202

[45] 王鹏, 宋献方, 侯士彬. 太行山区典型植被对土壤水势动态的影响研究[J]. 自然资源学报, 2009, 24(8): 1467–1476
WANG P, SONG X F, HOU S B. A study of representative vegetation effects on soil water potential in Taihang Mountainous Region[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(8): 1467–1476

[46] ZHENG W B, WANG S Q, SPRENGER M, et al. Response of soil water movement and groundwater recharge to extreme precipitation in a headwater catchment in the North China Plain[J]. Journal of Hydrology, 2019, 576: 466–477

[47] 孙吉定, 郝铁山, 张金香. 太行山花岗片麻岩区加速封山后森林植被恢复技术研究[J]. 北京林业大学学报, 1996, 18(S3): 55–61
SUN J D, HAO T S, ZHANG J X. Research on forest vegetation restoration after accelerated closure in granite gneiss region of Taihang Mountain[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1996, 18(S3): 55–61

[48] 徐学华, 张金柱, 张慧, 等. 太行山片麻岩区植被恢复过程中物种多样性与土壤水分效益分析[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2): 133–136
XU X H, ZHANG J Z, ZHANG H, et al. Analysis on species diversity of vegetation in restoration and efficiency of water in with gneissose of Taihangshan Mountian Region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(2): 133–136