

北京土石山区坡面土壤水分动态及其对微地形的响应

梁潇瑜, 信忠保, 王志杰

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要: 为了探讨不同微地形下坡面土壤水分的时空分布及其变异规律,以北京土石山区人工林坡面为研究对象,在40 m×50 m坡面共布设30个土壤水分观测点,分10 cm间隔观测,观测深度为50~70 cm。2015年4—10月使用Diviner 2000共监测土壤水分20次。结果表明:(1)坡地土壤水分含量时间变化趋势一致,大体随着降雨波动的变化而变化。(2)土壤水分随坡位变化而变化,水平阶上坡位<中坡位,缓坡中坡位<下坡位。(3)坡面土壤水分整体随深度的增加而增加,水土保持工程措施可有效改善土壤水分状况,微地形主要影响>30 cm的土层,不同微地形土壤水分含量表现为水平阶>缓坡>陡坡>陡坎,水平阶土壤水分显著高于其他微地形($P<0.05$)。(4)冗余分析结果显示,微地形是影响坡面土壤水分异质性的主控因素,相对贡献率达81.2%,微地形因素减弱了海拔和坡位对土壤水分含量的影响。该研究可为土石山区生态恢复对水文水资源影响评估提供科学依据。

关键词: 土石山区; 土壤含水量; 微地形; 坡位

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)03-0094-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.03.014

Soil Water Dynamic on Slope and Its Response to Microtopography in Beijing Rocky Mountainous Area

LIANG Xiaoyu, XIN Zhongbao, WANG Zhijie

(College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: To understand the temporal and spatial distribution and variation of slope soil water in different microtopography. In this study, the Beijing Jiufeng National Forest Park slope forest was taken as the research object. Based on detailed investigation, 30 soil water observation points that with 10 cm intervals were arranged on the slope of 40 m × 50 m, and the observation depth ranges from 50 to 70 cm. We conducted a total of 20 soil water observations from April 2015 to October 2015. The results showed that: (1) Slope soil water has the same temporal change trend, and it generally changes with the fluctuation of the rainfall. (2) The soil water changed with the change of the slope position, for horizontal step, the upper slope position < the middle slope position; for gentle slope, the middle slope position < the down slope position. (3) The overall slope soil water content increased with soil depth. Soil and water conservation engineering measures could effectively improve the soil water status. The microtopography mainly affected the soil layer larger than 30 cm. Soil water content of different microtopography was shown as: level bench > gentle slope > steep slope > scarp, soil water content of level bench was significantly higher than that of other microtopography ($P<0.05$). (4) Redundant analysis results showed that microtopography was the main factor affecting soil water content, with relative contribution rates of 81.2%. Microtopography factors weakened the influence of altitude and slope position on soil water content. This study could provide a basis for the assessment of the impact of ecological restoration of rocky mountainous areas on hydrology and water resources.

Keywords: rocky mountainous area; soil water content; microtopography; slope position

华北土石山区具有土层浅薄,微地形复杂多变,储水能力较差的特点。由于特殊的地质背景,北京土

石山区水土流失十分严重,严重威胁华北地区的生态环境^[1]。为了促进植被恢复和改善生态环境,该地区

进行了大规模的坡地改造工程。微地形改造最直接的效果是增加地表起伏度,从而提高降雨在坡面土壤中的保水能力,促进植被土壤水分的持续利用^[2-3]。水平阶是土石山区常见的水土保持措施,能够有效拦截降雨,减少径流流失,增加土壤入渗,减少土壤蒸发,从而达到水土保持的目的^[4]。因此,了解水土保持工程措施对坡面土壤水分空间变异性的影响,可为该地区生态恢复提供理论依据。

坡面尺度是认识地表土壤水分变化的基础。近年来,国内外对坡面土壤水分时空变异性的研究^[5-7]有很多。坡面尺度的土壤水分异质性十分复杂,通常是多因素叠加下协同作用的影响,并且随着环境条件的变化而变化^[8]。姚雪玲等^[9]通过研究黄土高原坡面不同植被类型的土壤水分含量发现,植被类型削弱了地形引起的土壤水分变异性;刘宇等^[10]发现,叶面积指数、枯落物厚度是影响坡面土壤水分异质性的主要因素。土壤水分的空间变异性及其影响因素在坡面尺度上得到了广泛的研究,但已有研究^[11-12]大多数都集中在不同土地利用类型对坡面土壤水分异质性的影响,而对于工程措施下的坡面土壤水分变化的影响机制了解较少,尤其是对多因素耦合机制下水文效应。基于此,本研究以北京土石山区坡地为研究对象,该坡地已经坡地改造,并布设了相应的水土保持措施,揭示坡面不同微地形条件下土壤水分特征及其影响因素,并分析影响坡面土壤水分的主控因素。为深入了解土石山区坡面水文过程、坡面植被恢复和林业综合管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究样地位于中国北京鹫峰国家实验站(39°54'N, 116°28'E),气候类型属于大陆性季风气候区。年平均降水量 650 mm,年均潜在蒸发量 1 900 mm,降水多集中在 7—9 月,占全年降水 80%,年均气温 11.6 °C。林场内部山地高差较大,海拔 100~1 153 m,地形复杂多样,山地坡度以 15°~35°为主,占山地总面积的 70.4%。林场森林植被覆盖率超过 96%,研究区土壤类型为普通褐土,土层较薄,砾石含量较高。主要的植被类型为耐寒针叶树,以侧柏(*Platycladus orientalis* (L.) Franco)为主导。

1.2 采样及测定方法

基于野外调查,本研究以人工侧柏林的自然坡地为研究对象,坡地长 40 m,宽 50 m,包括从坡顶到坡底整个自然坡面。研究是从山脊向下到沟缘的整个自然坡面,共设置了 30 个观测点。布设方式为线状

布设,坡面中央条带上顺坡向下每隔 10~12 m 依次确定上坡、中坡、下坡的监测点。顺等高线方向布设 3~6 个重复观测点位,顺坡布设 7 个条带,每条带布设 4~7 个观测点位。坡面样地海拔为 158.1~178.6 m,坡度多在 15°以上。根据微地形,样地可以分为水平阶、陡坎、缓坡地、陡坡地等立地类型。

坡面受人工整地影响,土层深度在坡面各个位置有所差别。观测深度均为母质层以上,包括整个土壤层,每隔 10 cm 测定 1 次。水平阶和下部局部平缓的地方土层较厚,土壤水分观测深度为 70 cm。坡面上部陡坎处和坡下陡坡地上土层相对较薄,土壤水分的观测深度为 50 cm 或 60 cm。在 2015 年 4 月 5 日至 10 月 31 日期间使用 Diviner 2000 共观测 20 次,每月至少进行 1 次观测,在非雨季通常以半月间隔观测,在雨季适当加密观测次数,5 天观测 1 次。

1.3 统计分析

描述性统计和差异性分析采用 SPSS 23.0 软件计算,使用 Origin 2021 软件进行作图,使用 Canoco 5.0 软件进行冗余分析,分析影响因素与各土层土壤水分之间的关系,提取影响坡面土壤水分异质性的主控因素。

2 结果与分析

2.1 坡面土壤水分时间变化

观测期间 2015 年 4 月 5 日至 10 月 31 日的降水、气温变化见图 1。观测期间最低气温 5.8 °C,最高气温 31.2 °C,且高温一般出现在 7—8 月。共发生 63 次降雨事件,累积降雨量 554.9 mm。在所有的降雨事件中,降雨量 < 5 mm 的事件共 34 次,共计降雨 44.2 mm,占观测期间总降雨量的 7.97%。> 20 mm 的降雨共 6 次,集中在 7—9 月,共计降雨 293.9 mm,占观测期间总降水量的 52.96%,6 次大雨显著影响了坡面土壤水分变化。

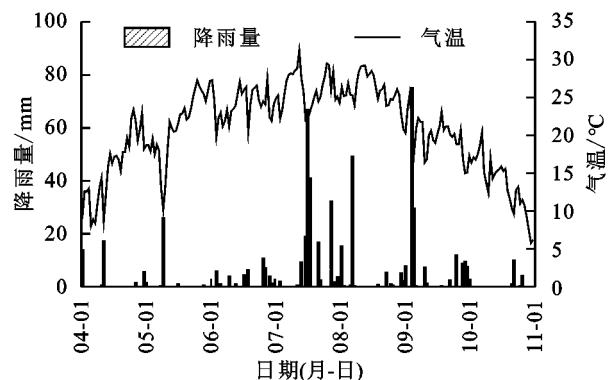


图 1 观测期间降雨量和气温变化

由图 2 可知,整个观测期间不同微地形土壤水分时间变化受降雨和气温的影响,坡面尺度下不同微地形土壤水分分布及其变化过程有一定的差异性,但总

体上具有显著的一致性,不同微地形土壤水分含量大体都随着降雨波动的变化而变化。此外,在降雨充足时($>20\text{ mm}$),土壤水分快速补充,坡面土壤水分含量明显有增加的趋势并且增加至极大值,暴雨对坡面土壤水分的补给十分明显。当遭遇长期无降雨或小雨的情况(8月8日至9月3日),气温达到最高,受地表蒸发和植被蒸腾的作用,坡面土壤水分含量快速降低。

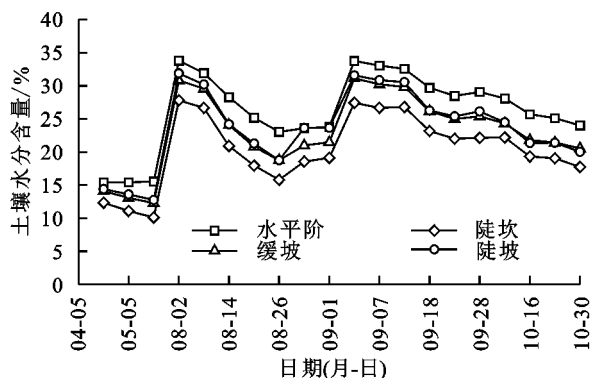


图2 不同微地形土壤水分时间变化

由表1可知,表层(0—10 cm)土壤水分含量显著低于其他土层土壤水分($P<0.05$),并且表现出强变异性($CV>0.3$)。这是由于表层(0—10 cm)土壤水分受降雨和气温的影响非常大,具有较大的时间变异性,而其他土层土壤水分表现出中等变异性($0.1<CV<0.3$)。坡面土壤水分含量整体随着土层深度的增加而增加,60—70 cm土层土壤水分达到了最大值($29.93\% \pm 5.82\%$),且显著高于其他土层土壤水分($P<0.05$),这是由于坡面土壤水分在重力作用快速下渗的结果。随着土层深度增加,深层土壤水分受气温和蒸发的作用较小,各土层的时间变异系数也随着土层深度的增加不断减小。

表1 坡面不同土层土壤水分含量统计分析

单位: %

土层深度/cm	平均值	标准差	变异系数	最大值	最小值
0—10	15.06c	6.22	0.41	26.12	3.11
10—20	23.68b	5.54	0.23	32.08	13.69
20—30	25.38b	5.47	0.22	33.66	15.11
30—40	25.21b	5.18	0.21	32.66	15.12
40—50	27.48ab	5.46	0.20	34.54	16.08
50—60	27.71ab	5.67	0.20	34.99	15.48
60—70	29.93a	5.82	0.19	36.80	16.63

注:同列不同小写字母表示不同土层间土壤水分含量差异显著($P<0.05$)。

2.2 不同微地形土壤水分特征

受降雨补给和植被蒸散的影响,不同微地形的土壤水分垂直分布规律不同,土壤水分含量为整个观测

期间(4—10月)的平均值。除陡坎外,不同微地形的土壤水分含量随着土层深度的增加有增加趋势(图3)。在0—30 cm土层,不同微地形下土壤水分趋势相同,都随着土层深度的增加而增加,且相互之间没有显著性差异($P<0.05$)(图4),说明微地形对浅层(0—30 cm)土壤水分影响不是很大。而在30 cm以下的土层,水平阶的土壤水分含量($30.02\% \pm 5.59\%$)显著高于其他微地形($P<0.05$),分别是陡坎、缓坡和陡坡的1.42,1.19,1.16倍。对于深层土壤水分来说,水土保持措施(水平阶)使土壤水分更容易滞留,具有良好的保水作用。陡坎的土壤水分含量($21.11\% \pm 4.97\%$)显著低于其他微地形($P<0.05$),并且随着土层深度的增加逐渐降低,这是由于陡坎独特的地形特点造成深层土壤水分难以滞留。缓坡和陡坡深层土壤水分($>30\text{ cm}$)逐渐趋于稳定,且两者的土壤水分含量无显著差异。

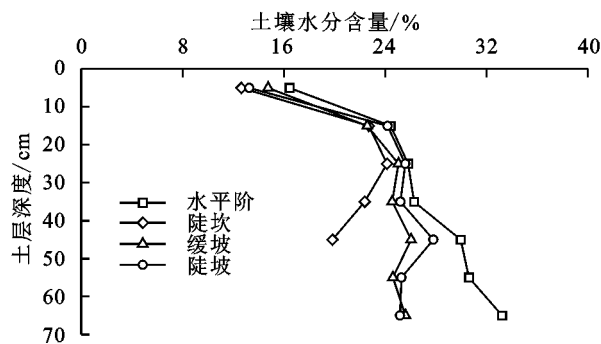
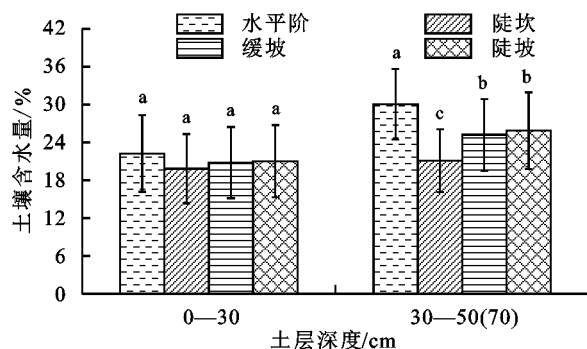


图3 不同微地形土壤水分垂直变化



注:图柱上方不同小写字母表示同一深度不同微地形的土壤水分含量差异显著($P<0.05$);图中数据表示平均值 \pm 标准差。下同。

图4 不同微地形对土壤水分的影响

2.3 坡位土壤水分变化

通过计算全剖面平均土壤蓄水量发现,坡面土壤水分上坡位($(176.0 \pm 39.5)\text{ mm}$) $>$ 中坡位($(174.9 \pm 39.1)\text{ mm}$) $>$ 下坡位($(166.3 \pm 39.9)\text{ mm}$),这是在微地形影响下的土壤水分状况。为了减小并排除微地形对土壤水分的影响,选择了同一微地形不同坡位的土壤水分含量进行计算,其中包括13个水平阶(10个上坡,3个中坡)和9个缓坡(4个中坡,5个下坡)。

通过比较相同微地形不同坡位的土壤水分含量发现与全坡面相反的结果。在各个土层,水平阶中坡位土壤水分始终大于上坡土壤水分含量,中坡位的土壤蓄水量((223.9 ± 40.6) mm)较上坡位的土壤蓄水量((176.0 ± 36.5) mm)增加了 27.2%。各土层缓坡的下坡位土壤水分始终大于中坡位土壤水分,下坡位土壤蓄水量((171.5 ± 41.8) mm)较上坡位土壤蓄水量((158.4 ± 37.6) mm)增加了 8.26%。说明同一微地形条件下,土壤水分含量基本呈现坡顶到坡底增加的趋势(图 5,图 6)。

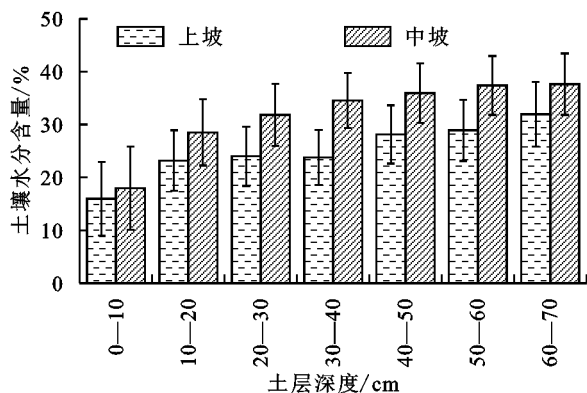


图5 不同坡位水平阶土壤水分含量

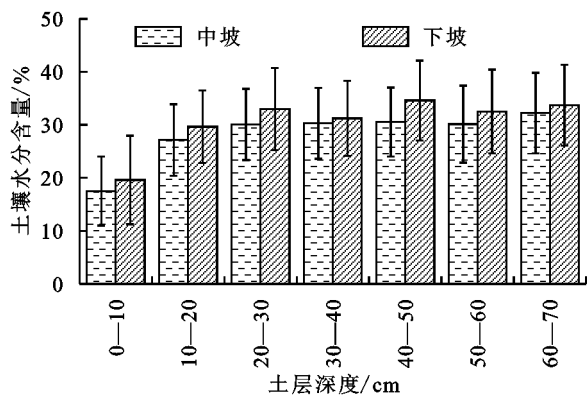


图6 不同坡位缓坡土壤水分含量

2.4 影响因子与土壤水分含量分析

为解释坡面土壤水分与影响因素的关系,基于线性模型进行冗余分析。本研究的影响因子包括海拔、坡位和微地形。其中,3类坡位 1,2,3 分别为上、中、下坡位。4类微地形 1,2,3,4 分别为水平阶、缓坡、陡坡、陡坎。由图 7 可知,排序轴中前 2 轴能够累计解释采样点和影响因子之间总方差的 94.57%,所以选择前 2 轴来分析土壤水分与影响因素的相互关系,并用前 2 轴来做二维排序图。RDA 排序的第 1 轴和第 2 轴分别主要反映了微地形和坡位的梯度变化。影响因素的连线长度代表影响因子与土壤水分异质性相关性的大小,箭头越长相关性越大。微地形因素的长度最长,坡位因素次之,海拔因素最短。通过计算各影响因子对土壤水分含量的相对贡献率,得到微

地形的相对贡献率达 81.2%,坡位的相对贡献率为 10.1%。微地形是影响土石山区坡面土壤水分含量的主控因素,坡位次之,海拔因素最小。

从影响因子与各土层土壤水分含量的夹角来看,微地形因素与所有土层土壤水分含量皆呈负相关。从水平阶、缓坡、陡坡到陡坎,土壤水分含量逐渐降低。对于坡位来说,10—30 cm 土层夹角呈锐角。土壤水分含量与坡位呈正相关,即随着坡位从上坡位转变为下坡位的过程中,土壤水分含量逐渐增加,坡位更容易影响浅层的土壤水分。

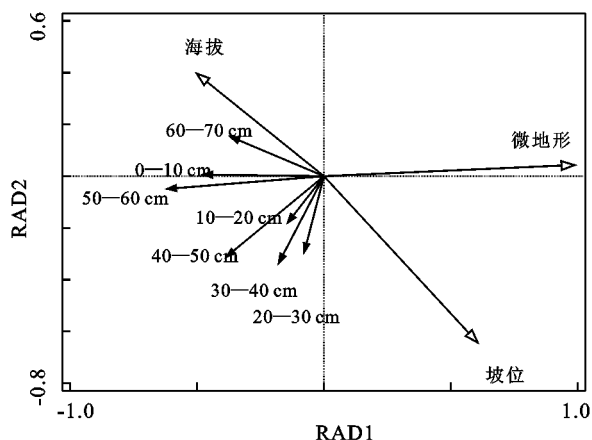


图7 坡面土壤水分 RDA 排序

3 讨论

降雨是坡地土壤水分补给的唯一来源,长期尺度下来看,坡面土壤水分含量受气候因素影响,降雨和气温是控制坡面土壤水分的重要因素^[13]。本研究表明,当暴雨产生时(>20 mm),降雨对土壤水分形成了有效的补给,土壤水分含量迅速增加。当处于长期无降雨或少雨的情况时,在夏季的暴晒下,气温逐渐变为主导因素。由于剧烈的地表蒸发和植被蒸腾,土壤水分含量迅速降低,这与周学雅等^[14]的研究结果一致。降雨的分布、强度、频次是影响坡面土壤水分动态变化的关键因素^[2,15]。在本研究中,0—10 cm 土层土壤水分受气候变化十分剧烈,变异系数达到 0.41,与马迎宾等^[16]的研究结果一致。降雨使土壤含水量整体提高,土壤水分的空间分布格局并没有根本改变。随着土层深度的增加,土壤水分含量和变异系数受降雨、气温的影响逐渐减小。

坡面水平阶、陡坎、缓坡、陡坡等不同的微地形会造成不同的水文效应^[17-18]。本研究结果表明,水平阶的土壤水分含量显著高于微地形($P < 0.05$),与李艳梅等^[19]研究结果相似,与自然坡面相比,微地形改造(水平阶)能将 83% 的降雨转化为土壤水分。Thompson 等^[20]也发现,微地形增加了降雨渗透的比例,加强了坡地土壤中降雨的保留。水土保持工程

措施是山区生态修复的重要方式,在降雨的条件下,水平阶通过影响下垫面而减缓了径流的运输,增加了土壤水分的入渗,水平阶为降雨再分配保留了更充足的土壤水分^[21]。在本研究中,在 0—30 cm,由于坡地土壤水分的快速入渗,不同微地形下土壤水分无显著差异($P < 0.05$)。而对于 > 30 cm 的土层,水平阶土壤水分含量显著高于其他微地形($P < 0.05$)。冯天骄等^[22]通过对比自然坡面和布设工程措施坡面的土壤水分含量也发现,30 cm 以上的坡地土壤水分才会有显著差异。

已有研究^[12]表明,坡面土壤水分异质性受多因素影响。自然状态下,坡面土壤水分沿坡面的变化基本呈现下坡位 $>$ 中坡位 $>$ 上坡位的趋势。上坡位具有更大的地表蒸发和植被蒸腾速率。降水在坡面上通过径流、壤中流的补充,以及受重力的自由下渗,土壤水分含量由高向低处汇聚,导致上坡位土壤水分含量低于下坡位^[23]。与其他研究^[3,24]不同,本研究的土壤水分随着坡位的降低而降低。原因是该研究坡地的上坡位全部修筑了水平阶,而下坡位全是缓坡和陡坡,不同微地形会通过控制坡面水文生态过程而改变土壤水分的空间异质性。多样化的微地形结构会扰乱坡位对土壤水分的影响,水平阶的保水能力改变了土壤水分从坡上到坡下逐渐增加的原有趋势,由于上坡位水平阶的存在,增加了保水效益,免于土壤水分随重力迅速流失。本研究在保证微地形相同的情况下,研究了水平阶上坡位和中坡位,缓坡中坡位和下坡位的土壤水分状况,所得到的土壤水分状况沿坡位的增加总体上呈降低趋势,即从坡顶到坡底呈增加的趋势,符合坡面土壤水分变化的自然趋势。通过 RDA 分析表明,微地形因素是影响坡面土壤水分含量的主控因素,相对贡献率达 81.2%,水平阶的构造相对削弱了坡位和海拔对土壤水分的影响。

对于坡地微地形的改造,水平阶的构造对于维持和恢复坡面土壤水分的变化具有更大的积极意义。为有效维持土石山区的土壤水分,合理改造陡坎类微地形是有效的办法,充分利用微地形土壤水分与植被配置模式相结合,从而促进植被的生长恢复。工程措施应当更广泛地应用在石多土少的土石山区,坡面片段化作为坡面重建单元,改善坡面微地形在减少降雨径流、提高水资源的利用和保持水土具有更广阔的前景。

4 结论

(1)坡地不同微地形土壤水分分布及其时间变化过程有一定的差异性,但总体上具有显著的一致性,

不同微地形土壤水分含量大体都随着降雨波动的变化而变化。

(2)不同微地形土壤水分垂直分布有显著差异,且微地形主要影响 > 30 cm 的土层。水平阶土壤水分显著高于其他微地形,陡坎土壤水分显著低于其他微地形($P < 0.05$)。

(3)冗余分析结果显示,微地形是影响坡面土壤水分变化的主控因素,相对贡献率达 81.2%。微地形因素减弱了坡位和海拔对土壤水分的影响,水平阶措施提高了土壤水分储量,在土石山区坡面进行水土保持工程措施可以有效改善土壤水分状况。

参考文献:

- [1] 张铁钢,李占斌,李鹏,等.土石山区不同植物土壤水分利用方式对降雨的响应特征[J].应用生态学报,2016,27(5):1461-1467.
- [2] 于洋,卫伟,陈利顶,等.黄土丘陵区坡面整地和植被耦合下的土壤水分特征[J].生态学报,2016,36(11):3441-3449.
- [3] 张志华,郭加伟,桑玉强,等.太行山南麓鱼鳞坑工程对坡面土壤水分空间变异性的影响[J].灌溉排水学报,2021,40(9):85-92.
- [4] 卫伟,余韵,贾福岩,等.微地形改造的生态环境效应研究进展[J].生态学报,2013,33(20):6462-6469.
- [5] Wei W, Chen D, Wang L X, et al. Global synthesis of the classifications, distributions, benefits and issues of terracing [J].Earth-Science Reviews,2016,159,388-403.
- [6] 曹伟,盛煜,吴吉春,等.青藏高原坡面冻土土壤水分空间变异特性[J].水科学进展,2017,28(1):32-40.
- [7] 陶吉杨,谭军利,魏童,等.宁南山区不同植被退耕林地及其坡位的土壤水分时空分布特征:以骆驼林流域为例[J].水资源与水工程学报,2020,31(4):216-222.
- [8] 张晨成,邵明安,王云强,等.黄土区切沟对不同植被下土壤水分时空变异的影响[J].水科学进展,2016,27(5):679-686.
- [9] 姚雪玲,傅伯杰,吕一河.黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因子[J].生态学报,2012,32(16):4961-4968.
- [10] 刘宇,王彦辉,郭建斌,等.六盘山华北落叶松人工林土壤水分空间异质性的降雨前后变化及其影响因素[J].水土保持学报,2016,30(5):197-204.
- [11] 韩姣姣,段旭,赵洋毅,等.干热河谷不同土地利用类型坡面土壤水分时空变异[J].水土保持学报,2017,31(2):129-136.
- [12] 郭欣欣,付强,卢贺,等.东北黑土区农林混合利用坡面土壤水分空间异质性及主控因素[J].农业工程学报,2018,34(19):123-130.
- [13] 赵维军,马欢,朱清科,等.陕北黄土区微地形土壤水分对降水特征的响应[J].农业机械学报,2014,45(5):

- 118-124.
- [14] 周学雅,杨婷婷,王安志,等.科尔沁沙地沙丘一丘间低地降雨前后土壤水分分布特征[J].生态学杂志,2017,36(1):157-163.
- [15] 何子森,肖培青,郝仕龙,等.黄丘区野外坡面土壤水分变化对次降雨过程的响应[J].中国水土保持科学,2018,16(4):16-24.
- [16] 马迎宾,黄雅茹,王淮亮,等.采煤塌陷裂缝对降雨后坡面土壤水分的影响[J].土壤学报,2014,51(3):497-504.
- [17] 申明爽,朱清科,王瑜,等.陕北黄土区不同微地形土壤水分变化趋势分析[J].北京林业大学学报,2018,40(3):84-92.
- [18] 司梦可,曹建生,阳辉.微地形变化对地表水文过程影响的研究进展[J].中国生态农业学报(中英文),2019,27(10):1587-1595.
- [19] 李艳梅,王克勤,陈奇伯,等.金沙江干热河谷微地形改造对土壤水分运动参数的影响研究[J].水土保持研究,2008,15(4):19-23.
- [20] Thompson S E, Katul G G, Porporato A. Role of microtopography in rainfall-runoff partitioning: An analysis using idealized geometry [J]. Water Resources Research, 2010, 46(7):1-11.
- [21] 宿婷婷,韩丙芳,马红彬,等.水平沟整地措施对黄土丘陵区草原土壤水分动态平衡的影响[J].农业工程学报,2019,35(21):125-134.
- [22] 冯天骄,卫伟,陈利顶,等.黄土丘陵区小流域不同整地措施长期影响下的土壤水力学特性[J].环境科学,2017,38(9):3860-3870.
- [23] 安文明,韩晓阳,李宗善,等.黄土高原不同植被恢复方式对土壤水分坡面变化的影响[J].生态学报,2018,38(13):4852-4860.
- [24] 黄艳丽,李占斌,苏辉,等.人工林对黄土高原小流域上下游不同坡面土壤水分的影响[J].农业工程学报,2018,34(15):108-116.
- (上接第93页)
- [31] Zhang Y S, Lu X, Liu B Y, et al. Spatial relationships between ecosystem services and socioecological drivers across a large-scale region: A case study in the Yellow River Basin [J]. Science of the Total Environment, 2020,766:e142480.
- [32] 苏冰倩,王茵茵,上官周平.西北地区退耕还林工程对粮食生产与农民生计的影响[J].水土保持通报,2017,37(2):247-252.
- [33] 陈立恒,龚健,王雄,等.长江中游地区生态系统服务平衡与城镇化的空间关系[J].生态学报,2021,41(14):5546-5556.
- [34] 欧阳晓,朱翔,贺清云.城市化与生态系统服务的空间交互关系研究:以长株潭城市群为例[J].生态学报,2019,39(20):7502-7513.
- [35] Tian Y Y, Jiang G H, Zhou D Y, et al. Systematically addressing the heterogeneity in the response of ecosystem services to agricultural modernization, industrialization and urbanization in the Qinghai-Tibetan Plateau from 2000 to 2018 [J]. Journal of Cleaner Production, 2021,285:e125323.
- [36] 刘莹,耿文亮,邵静文,等.“三生空间”视角下土地利用变化与生态系统服务价值响应:以黄河下游地区为例[J].地域研究与开发,2021,40(4):129-135.
- [37] Pan H Z, Page J, Cong C, et al. How ecosystems services drive urban growth: Integrating nature-based Solutions [J]. Anthropocene, 2021,35(19):e100297.