DOI: 10.5846/stxb201807061479

刘雅莉,杜剑卿,李锋,高海宁,胡聃.微尺度下城市公园人造绿地土壤水分的时空分异格局及其驱动机制.生态学报,2019,39(18): - . Liu Y L, Du J Q, Li F, Gao H N, Hu D.Pattern and mechanism of microscale spatial-temporal variation in soil moisture at an artificial grassland in an urban park.Acta Ecologica Sinica,2019,39(18): - .

微尺度下城市公园人造绿地土壤水分的时空分异格局 及其驱动机制

刘雅莉^{1,2},杜剑卿²,李 锋³,高海宁^{1,2},胡 聃^{1,*}

1 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085
2 中国科学院大学,北京 100049
3 清华大学 建筑学院,北京 100084

摘要:水是生态系统的基本非生物组成要素,土壤水分对生态系统结构和功能有重要影响。微地形改造被证明能有效涵养水源、防止水土流失,并被广泛应用在生态恢复工程中。然而,在微尺度下人造生态系统土壤水分的时空分异格局及其驱动机制仍不明确。本研究选择北京奥林匹克森林公园一处集合了4种不同地形的草地作为研究对象,对表层(0—10cm)和深层(10—25cm)土壤水分开展了长期的研究工作。研究结果表明,不同地形上土壤水分的季节变化特征没有显著差异,土壤温度是影响土壤水分季节变化的主要因素。在植被覆盖均匀的条件下,微地形对土壤表层水分的空间分布格局有显著影响,除洼地和冲沟两种特殊地形外,坡度决定的生态水文过程是主要的驱动机制;土壤深层水分没有明显的空间分布格局。研究结果说明在微尺度下,微地形通过影响土壤水分的空间分布格局,可能会对生态系统结构和功能产生潜在影响,应当在景观改造和生态恢复相关研究和工程应用中给予更多的关注。

关键词:土壤水分;微地形;时空格局;生态恢复;生态水文过程

Pattern and mechanism of microscale spatial-temporal variation in soil moisture at an artificial grassland in an urban park

LIU Yali^{1,2}, DU Jianqing², LI Feng¹, GAO Haining¹, HU Dan^{1,*}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco – Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: Water is the most basic element of ecosystem and is crucial to ecosystem structure and function. The transformation of microtopography has been widely used in ecological restoration to conserve soil water. However, the pattern and mechanisms of spatial-temporal variation in soil moisture at the micro-scale remain unclear. In this study, both topsoil (0-10 cm) and subsoil (10-25 cm) water content of four microtopographic types, which were located on an artificial grassland inside Beijing Olympic forest park, were monitored for one year. Only the topsoil water content was significantly affected by microtopography. Through eco-hydrological processes, slope gradient was an important impact factor for the spatial distribution of soil moisture. However, temporal variation in soil moisture showed no response to microtopography and was significantly affected by soil temperature. Therefore, further study is needed to reveal the potential effects of artificial

基金项目:国家自然科学基金项目(41571482);国家自然科学基金项目(71734006);国家重点研发计划重点专项(2016YFC0502804)

收稿日期:2018-07-06; 网络出版日期:2019-00-00

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: hudan@ rcees.ac.cn

microtopography on ecosystem structure and function, especially in the field of landscape transformation and ecological restoration.

Key Words: soil moisture; microtopography; spatial-temporal pattern; ecological restoration; eco-hydrology

水是生命之源,是生态系统的基本非生物组成要素。土壤水分直接影响植物生长,并决定了植物群落结构^[1-3],而植物具有涵养水分、减少水土流失^[4-6]、美化景观等积极作用,是城市景观生态系统不可或缺的要素。此外,土壤水分可以通过对土壤有机质矿化作用的调节影响生态系统的养分循环过程^[7-9],还可以通过改变植物和分解者群落结构间接影响生态系统的碳排放过程。因此,土壤水分对生态系统结构和功能有着重要的影响。

城市作为人类高密度居住的区域,目前我国城镇人口已经达到总人口的57.35%,且呈急剧增加趋势^[10]。随着城市化进程加快,硬化地表面积大幅增加^[11],城市生态系统中具备涵水功能的自然地表主要集中在城市公园。土壤水分对于城市公园绿地至关重要,降水是影响土壤水分的主要因素^[12-13],而地形地貌能显著影响土壤水分的再分配,调节降水入渗和土壤蒸发作用^[14-15]。就北京而言,全市年平均降水量较少且集中,故通过微地形改造提高城市绿地的水分涵养能力有着重要意义。近年来诸多研究表明,微地形对土壤属性^[16]、植被覆盖、微气候和微生境都有重要影响^[17-20]。然而,国内对土壤水分的研究重点关注于土地利用类型对土壤水分的影响^[21-24],虽然也涉及到坡向^[25]、坡度^[26]、坡位^[27]、海拔^[28-29]等微地形因子的影响,但是对城市生态系统中土壤水分的研究较少,特别是微尺度的人造生态系统(如城市公园绿地等)。因此,系统研究微尺度下城市公园人造绿地土壤水分的时空分异格局及其驱动机制,能够指导城市生态系统景观设计,有效提高土壤水分涵养能力和利用效率,改善城市生态环境。

本文选择北京奥林匹克森林公园一处人造绿地中的4种不同微地形(陡坡、缓坡、冲沟和洼地)作为研究 对象,在一个完整水文年内对土壤湿度和温度开展了长期监测,系统分析了微尺度下土壤含水量的时空分异 格局及其驱动机制。

1 研究区概况

研究区域位于北京市奥林匹克森林公园南园(40°01′3.00″N, 116°23′2.98″E),地处北京市朝阳区北五环, 占地面积 680 hm²,绿化面积 478 hm²,水域面积 67.7 hm²,绿化覆盖率 95.61%。区域气候为典型的北温带半 湿润大陆性季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,春、秋短促,多年平均气温约为 14℃,多年平均降水量为 583mm,降水多集中在 6—8 月,常伴有大雨。

研究样地面积约800 m²,位于一处人造坡地上。该人造坡地建成于2008年,初期没有植被覆盖,也没有 人工种草,现有植物群落是自然演替结果。研究样地优势种主要是马唐,是北京地区常见的先锋种。

2 研究方法

2.1 样点布设与采样方法

研究区域自北向南依次是冲沟(Gully,简称Gu)、陡坡(Steep slope,简称Ss)、缓坡(Gentle slope,简称Gs) 和洼地(Depression,简称De),其中冲沟与陡坡间距约40m,陡坡与缓坡间距约30m,洼地紧邻缓坡上部(图 1)。缓坡和陡坡依据国际地理学联合会地貌调查与地貌制图委员会的坡度等级划分标准。在陡坡、缓坡和 冲沟的上部(U)、中部(M)、下部(D)设置三个采样点位,其中坡上到坡中的距离是3米,坡中到坡下的距离 是4米;在洼地的中心和边缘各设置一个采样点位。冲沟表面无植被覆盖,其余点位在生长季有植被覆盖。

2016年6月至2017年3月间,共开展了10次监测与采样工作。为了排除植物的影响,在时间上划分了 生长季和非生长季,选取2016年12月至2017年3月为非生长季,其余时间为生长季,生长季除冲沟外均有

植被覆盖,非生长季所有地形均无植被覆盖。此外,由于北京的降雨普遍集中在夏季,故加入雨季这一特定时 期研究集中降雨对不同地形土壤水分的影响。其中,5次样品采集于生长季,5次样品采集于非生长季。2016 年8月的3批次样品同时作为雨季的样品。采集土壤样品时分为0—10cm和10—25cm两层,每个样点随机 选取三点,用直径3cm土钻各取一钻土后混合,用烘干法测定土壤含水量^[30]。土壤温度利用热电偶探头在现 场测量。



Fig.1 Sketch of the study design

2.2 数据处理

使用 Microsoft Excel 软件对研究区土壤水分的数据作整体统计分析,使用 SPSS19.0 软件对土壤含水量数据进行异常值检测、方差分析和相关性分析,相关图形采用 Origin 9.0 和 Adobe illustrator CC 2017 软件完成。

3 结果与分析

3.1 不同剖面土壤水分的时空变异情况

全年来看(表1),除2016年10月和2017年3月底两期结果外,表层土壤含水量均值普遍高于下层,但 是统计分析结果不显著(P=0.078);两层土壤各期的含水量均有较高的变异系数(表层为16.49%—58.77%, 下层为16.74%—46.86%,均为中等变异性),表层土壤含水量各期变异系数的均值显著高于下层(P<0.01), 说明表层土壤水分的空间分异较下层更为明显。

无论表层还是下层,生长季土壤水分的均值和变异系数的均值同非生长季相比均没有显著差异。但是非 生长季表层和下层土壤水分的均值均高于生长季,且极大值都出现在冬季,极小值都出现在夏季。说明生长 季受相对较高气温带来的蒸发作用和植物的蒸腾作用共同影响^[31],土壤含水量降低,但影响并不显著,微尺 度下土壤水分并没有显著的季节分异特征。然而,同气温变化趋势相反,从夏季至冬季,土壤水分随时间呈现 上升趋势,说明温度可能是影响土壤水分时间变化的因素,故在下文中讨论两者间的相关关系。

3.2 微尺度下土壤水分的时空分异格局

3.2.1 空间分异格局

从空间格局来看(图 2),不同微地形间表层土壤含水量差异较大,下层则无显著差异,故下文重点讨论微 地形对土壤表层空间分异格局的影响。陡坡、缓坡和洼地的表层土壤含水量普遍高于下层,冲沟则相反,是由 于冲沟表层无植被覆盖,影响了土壤水分的垂直分布^[27],故后续选择冲沟作为研究对象讨论植被对土壤含水 量的影响。对不同深度土壤水分进行独立样本 t 检验,结果显示陡坡表层土壤水分显著大于下层(*P*<0.05), 缓坡的无显著性差异,说明坡度越大,降雨越容易产生地表径流,而垂直下渗量则减少,这与 Fox 等人^[32]的研 究结果一致。

Table 1 Statistical results of mass soil moisture content							
时间 Time	土层深度/cm Soil depth	平均值/% Mean	标准差 Standard deviation	最小值/% Minimum	最大值/% Maximum	变异系数 Variation coefficient	分布类型 Distribution
2016-6-19	0—10	12.62	6.77	3.02	24.18	53.64	正态
	10—25	11.25	5.27	5.1	22.84	46.86	正态
2016-8-18	0—10	20.34	11.95	11.77	55.5	58.77	正态
	10—25	16.89	3.09	11.91	22.08	18.3	正态
2016-8-19	0—10	16.45	7.49	9.97	36.88	45.58	正态
	10—25	14.46	2.9	9.91	19.98	20.1	正态
2016-8-22	0—10	14.02	4.49	7.1	23.59	32.07	正态
	10—25	13.59	2.39	9.01	16.52	17.57	正态
2016-10-26	0—10	15.55	4.55	8.38	24.48	29.29	正态
	10—25	15.59	3.84	8.14	22.9	24.62	正态
2016-12-9	0—10	24.9	10.11	10.35	44.92	40.59	正态
	10—25	18.03	4.01	8.71	24.07	22.28	正态
2017-2-24	0—10	17.82	7.41	8.89	37.66	40.59	正态
	10—25	17.79	5.47	13.53	26.48	30.76	正态
2017-3-23	0—10	19.43	6.51	11.93	35.49	33.49	正态
	10—25	17.77	3.73	10.65	23.87	21.01	正态
2017-3-25	0—10	19.18	4.72	13.57	29.41	24.61	正态
	10—25	17.82	2.98	13.41	23.1	16.74	正态
2017-3-28	0—10	14.76	2.43	9.65	17.86	16.49	正态
	10—25	16.85	2.85	10.17	20.62	16.95	正态







洼地在微地形改造中被广泛应用^[33-34]。就表层土壤含水量来看,洼地的土壤含水量普遍较高,在全年尺度上显著高于其他地形(其中洼地与缓坡和冲沟的差异性极显著(P<0.01),洼地和陡坡的差异性显著(P<0.05));在生长季中也显著高于其他地形(P<0.01);但是在非生长季,洼地仅同冲沟有显著差异(P<0.05)。

此外,将洼地中心和边缘处表层土壤含水量进行独立样本 t 检验,结果显示两者具有极显著差异(P<0.01),不同时期洼地内部的土壤含水量是边缘处的 1.17—2.2 倍。说明洼地能够有效存蓄雨水,提高土壤含水量^[35],因此在降雨较少且几乎没有地表径流产生的非生长季中土壤含水量同缓坡和陡坡相比差异不显著。洼地的中心和边缘处的水平距离不超过 1 米,然而土壤含水量却有显著差异,在城市公园绿地的设计中应充分考虑这类地形对土壤水分的涵养功能。

全年来看,陡坡和冲沟的土壤含水量也有显著差异(P<0.01);生长季中,陡坡、缓坡和冲沟的土壤含水量 差异不大;而非生长季中,陡坡的土壤含水量显著高于冲沟(P<0.01),均值也高于缓坡,但是差异并不显著 (P=0.272);雨季中,缓坡的土壤含水量均值则高于陡坡,但是也不显著(P=0.141)。在非生长季和雨季中, 陡坡和缓坡植被覆盖度基本一致,土壤温度也没有显著差异(非生长季 P=0.315,雨季 P=0.321)。因此,除 特殊地形(洼地、冲沟)的影响外,坡度可能是影响土壤水分空间分异格局的主要因素。

3.2.2 季节变化特征

从季节变化规律来看,除洼地表层土壤外,各种微地形上土壤含水量普遍呈现出非生长季>雨季≥生长季的规律,说明微地形对土壤水分的季节变化特征影响不大。而洼地表层土壤含水量则呈现出相反的趋势,体现了洼地对雨水的积蓄作用,说明洼地改变了表层土壤水分的季节变化规律(图3)。从统计分析结果来看,仅有陡坡各时期的表层土壤含水量存在显著差异,非生长季显著高于生长季(P<0.01)和雨季(P<0.01); 相比表层,下层土壤含水量的离散程度相对较低,陡坡非生长季的土壤含水量显著高于生长季(P<0.01),缓坡非生长季的土壤含水量显著高于生长季(P<0.01)和雨季(P<0.01)。非生长季同生长季最大的区别在于植被和温度,无植被覆盖的冲沟地形上非生长季土壤平均含水量仍高于生长季,再次证明温度是影响土壤水分时间变化特征的潜在因素,因此在下文中将详细探讨温度对土壤水分的影响。







3.3 微尺度下土壤水分时空分异格局的驱动机制

过往研究表明,地表热量对土壤水分平衡具有重要的影响作用^[36-37],而地形坡度^[15]和植被^[19]同土壤水 分也有显著的关联。结合上文分析结果,为了揭示微尺度下土壤水分的时空分异格局的驱动机制,选取坡度 类似的陡坡和冲沟作为对照组研究植物的影响;选择植被覆盖相对均匀的陡坡和缓坡作为研究对象,研究坡 度对土壤水分空间分布格局的影响以及温度对土壤水分时间变化特征的影响,以及两者的交互作用对土壤水 分时空分异格局的影响。

3.3.1 植物的影响

本研究中,冲沟的坡度同陡坡的坡度较为相似,均为斜陡坡级别。除冲沟地形发育有一条较浅的(小于 5 cm)的沟壑外,两种地形间的差异主要体现在冲沟表面无植被覆盖。因此,选择陡坡和冲沟作为对照组可以在排除坡度影响下探讨植被对土壤水分的影响(图 4)。土壤水分是连接气候变化和植被覆盖动态的关键因子,植被覆盖与土壤水分两者之间又是一种相互影响和制约的关系,植物(包括根系)能够极大地减少水分流失^[38],有效涵养土壤水分^[39-40],反过来植物生长和蒸腾作用又会消耗大量的土壤水分。因此,推断冲沟的土壤含水量与陡坡存在差异的主要是由植物造成的。结果显示植被对土壤水分的影响主要体现在表层,而对下层土壤水分几乎没有影响,植物地下生物量实地调查结果也显示研究区植被根系较浅,集中分布在表层 0—10cm 范围内。非生长季陡坡表层土壤含水量显著高于冲沟(P<0.01),生长季陡坡表层土壤水分也高于冲沟,但差异并不显著。由此可见,非生长季不存在植物蒸腾作用对土壤水分的消耗,植被根系依旧能够有效涵养土壤水分,且影响显著;而在生长季中,虽然植物对土壤水分存在涵养作用,但是植物的蒸腾作用同时也会消耗水分,因此该时期内植物对土壤水分的影响不显著。





综上所述,植被对土壤水分的影响深度与根系深度有关。冲沟与其他微地形间表层土壤水分的差异主要 是由于植物造成的,但是受地表径流冲刷的影响,没有或较少有植被覆盖也是冲沟地形的一个特征,因此在城 市公园景观设计中应将冲沟作为一种特殊地形考虑。

3.3.2 生态水文过程的影响

由上文已知,微地形可以通过洼地等特殊地形对地表径流的截留和存蓄作用影响微尺度下地表水文过程,间接影响土壤表层水分的空间分布格局。此外,在植被覆盖度基本一致、土壤温度没有显著差异的陡坡和缓坡,较为不同的环境因素主要是受降雨影响的地表产流与下渗过程。根据 Fox 等人^[32]的研究结果,坡度越大,降雨越容易产生地表径流,而垂直下渗量则减少。根据国家气象中心的统计数据,样地建成后至本研究结束期间(2008 年至 2017 年间),北京的降雨主要集中在 6 月至 9 月间,降雨量占年均总降雨量的 80%,降雨日平均日降雨量为 11.43mm,属于中雨级别,日降雨量达到大雨(25mm)以上的情况较为常见。研究期内,2016 年 6 月至 9 月间降雨量占全年的 83%,降雨日平均日降雨量为 16.27mm,属于中雨级别,地表径流较为明显, 在此期间缓坡可以更为有效的存蓄降雨,故而土壤含水量相对较高;而在非生长季中,降雨量极少(仅 26.3mm)且单次降雨强度普遍较低(仅 2.4mm),无地表径流产生,在此期间陡坡的下渗作用较弱,因此土壤水分主要积聚于表层。这一现象表明除特殊地形外(洼地、冲沟),坡度是影响微尺度下土壤水分空间分布格局的重要因素,但是受限于本研究中坡度变化范围较小(2°—17°),陡坡和缓坡间土壤含水量并未呈现出显著 差异。因此,在下文中将进一步分析坡度和土壤含水量间的相关关系。

综上所述,微地形通过特殊地形(如洼地等)和坡度影响了微尺度下地表生态水文过程,间接影响土壤表 层水分的空间分布格局,但该过程受降雨强度的影响在不同水文时期的作用是不同的。

3.3.3 坡度和土壤温度的影响

结果如图 5 所示,坡度同土壤水分均呈现出负相关关系,在陡坡上的影响显著而在缓坡上的影响不显著 (P=0.071)。本研究受限于研究尺度,采样点的坡度变化较小且仅有 6 个坡度水平,故不能精确反映坡度对 土壤水分的影响。但是,在坡度变化范围相对较大的陡坡仍呈现出显著的中等程度的相关性(R²=0.195,P< 0.05)。说明坡度可以影响土壤水分的空间分异格局。陡坡和缓坡的土壤温度同土壤水分均呈现出显著的负 相关关系,特别是在陡坡,呈现出极显著的强相关性(R²=0.377,P<0.01)。说明土壤温度可以显著影响土壤 水分的时间变化规律。坡度和土壤温度的组合变量拟合程度明显高于单一变量(表 2),两者的组合变量同土 壤含水量有显著的线性关系,且拟合度较好,说明两者的组合变量可以表征微尺度下土壤水分的时空变异格 局。偏相关分析结果显示土壤水分对温度的响应更加敏感,当坡度较小时,土壤水分受坡度的影响不显著。



图 5 坡度和土壤温度同土壤水分的线性回归分析 Fig.5 Linear regression between soil water content and slope, soil water content and soil temperature, respectively

4 结论

本文系统研究了微尺度下土壤水分的时空分异格局,并阐明了生态水文过程是其主要的驱动因子。植物 通过对水分的截留以及蒸腾作用影响土壤水分的空间分布格局,在植被覆盖均匀的条件下,微地形可以通过 特殊地形(如洼地等)和坡度影响微尺度下地表水文过程,间接影响表层土壤水分的空间分布格局,但受降雨 强度的影响该过程在不同水文时期的作用是不同的。同时,明确了微地形对土壤水分季节变化规律的影响较 小,土壤温度仍是影响微尺度下土壤水分季节变化的主要因素。揭示了坡度和土壤温度的组合变量可以表征

微尺度	下土壤水	分的时间	这变异格局。

Table 2	Linear regression between soil w	ater content and the influence	e factors and their partia	al correlation analysis
坡型	自变量	线性回归 Linear reg	偏相关系数	
Slopes	Independent variables	斜率 Slope	R^2	Partial correlation coefficient
陡坡 0—10cm	坡度 S	-0.942	0.195 *	-0.533 **
Steep slope $0-10$ cm	温度 T	-0.389	0.377 **	-0.668 **
	组合变量 S+T		0.554 **	
缓坡 0—10cm	坡度 S	-0.811	0.124	-0.372
Gentle slope 0—10cm	温度 T	-0.148	0.171 *	-0.430*
	组合变量 S+T		0.286 *	

表 2	十壤水分影响因子的线性回归分析与偏相关分析
12 4	工场小力影响自己的这位自为力力一面伯人力力

S: 坡度, Slope; T: 温度, Temperature; **; 在 P<0.01 上显著相关; *: 在 P<0.05 上显著相关

在微尺度下,微地形也可以通过影响土壤水分空间分布格局而对生态系统结构和功能产生潜在影响,但 是其具体影响和驱动机制仍不清楚。在人类活动对土地利用格局和地形地貌的影响逐渐加剧的背景下,有关 微地形对土壤环境以及生态系统的影响的研究,应当在景观改造以及生态恢复研究和工程应用中给予更多的 关注。此外,由于水文过程驱动下土壤水分空间分布格局受区域降雨特征的影响,因此当微地形改造应用于 城市景观建设或生态恢复工程中时,应结合工程目标和区域降雨特征,因地制宜地提出合理的设计方案。

参考文献(References):

- [1] 蔺鹏飞,朱喜,何志斌,杜军,陈龙飞.土壤水分时间稳定性研究进展.生态学报,2018,38(10):3403-3413.
- [2] Barton A M. Factors controlling plant distributions: drought, competition, and fire in montane pines in Arizona. Ecological Monographs, 1993, 63 (4): 367-397.
- [3] Lauenroth W K, Urban D L, Coffin D P, Parton W J, Shugart H H, Kirchner T B, Smith T M. Modeling vegetation structure-ecosystem process interactions across sites and ecosystems. Ecological Modelling, 1993, 67(1): 49-80.
- [4] 徐宪立,马克明,傅伯杰,刘宪春,黄勇,祁建. 植被与水土流失关系研究进展. 生态学报, 2006, 26(9): 3137-3143.
- [5] 周云艳,陈建平,王晓梅.植物根系固土护坡机理的研究进展及展望.生态环境学报,2012,21(6):1171-1177.
- [6] Casermeiro M A, Molina J A, De La Cruz Caravaca M T, Costa J H, Massanet M I H, Moreno P S. Influence of scrubs on runoff and sediment loss in soils of Mediterranean climate. CATENA, 2004, 57(1): 91-107.
- [7] Sierra J. Temperature and soil moisture dependence of N mineralization in intact soil cores. Soil Biology and Biochemistry, 1997, 29(9/10): 1557-1563.
- [8] Wang C H, Wan S Q, Xing X R, Zhang L, Han X G. Temperature and soil moisture interactively affected soil net N mineralization in temperate grassland in Northern China. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(5): 1101-1110.
- 9] Paul K I, Polglase P J, O'Connell A M, Carlyle J C, Smethurst P J, Khanna P K. Defining the relation between soil water content and net nitrogen mineralization. European Journal of Soil Science, 2003, 54(1): 39-48.
- [10] 于涛方. 中国城市人口流动增长的空间类型及影响因素. 中国人口科学, 2012, (4): 47-58.
- [11] Elvidge C D, Tuttle B T, Sutton P S, Baugh K E, Howard A T, Milesi C, Bhaduri B L, Nemani R. Global Distribution and Density of Constructed Impervious Surfaces. Sensors, 2007, 7(9): 1962-1979.
- [12] 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.生态学报,2012,32(16):4961-4968.
- [13] Cheng X L, An S Q, Li B, Chen J Q, Lin G H, Liu Y H, Luo Y Q, Liu S R. Summer rain pulse size and rainwater uptake by three dominant desert plants in a desertified grassland ecosystem in northwestern China. Plant Ecology, 2006, 184(1): 1-12.
- [14] Ziadat F M, Taimeh A Y. Effect of rainfall intensity, slope, land use and antecedent soil moisture on soil erosion in an arid environment. Land Degradation & Development, 2013, 24(6): 582-590.
- [15] Qiu Y, Fu B J, Wang J, Chen L D. Soil moisture variation in relation to topography and land use in a hillslope catchment of the Loess Plateau, China. Journal of Hydrology, 2001, 240(3/4): 243-263.
- [16] Sharma B D, Mukhopadhyay S S, Sidhu P S. Microtopographic controls on soil formation in the Punjab region, India. Geoderma, 1998, 81(3/4): 357-368.

- [17] Courtwright J, Findlay S E G. Effects of microtopography on hydrology, physicochemistry, and vegetation in a tidal swamp of the Hudson River. Wetlands, 2011, 31(2): 239-249.
- [18] Li X R, He M Z, Zerbe S, Li X J, Liu L C. Micro-geomorphology determines community structure of biological soil crusts at small scales. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 35(8): 932-940.
- [19] Mayor Á G, Bautista S, Small E E, Dixon M, Bellot J. Measurement of the connectivity of runoff source areas as determined by vegetation pattern and topography: A tool for assessing potential water and soil losses in drylands. Water Resources Research, 2008, 44(10): W10423.
- [20] Wolf K L, Ahn C, Noe G B. Microtopography enhances nitrogen cycling and removal in created mitigation wetlands. Ecological Engineering, 2011, 37(9): 1398-1406.
- [21] 索立柱,黄明斌,段良霞,张永坤.黄土高原不同土地利用类型土壤含水量的地带性与影响因素.生态学报,2017,37(6):2045-2053.
- [22] 卫伟,陈利顶,傅伯杰, 巩杰. 半干旱黄土丘陵沟壑区降水特征值和下垫面因子影响下的水土流失规律. 生态学报, 2006, 26(11): 3847-3853.
- [23] Wang Y Q, Shao M A, Zhu Y J, Liu Z P. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(4): 437-448.
- [24] Mohammad A G, Adam M A. The impact of vegetative cover type on runoff and soil erosion under different land uses. CATENA, 2010, 81(2): 97-103.
- [25] 苏子龙,张光辉,于艳.典型黑土区农业小流域不同坡向和坡位的土壤水分变化特征.中国水土保持科学,2013,11(6):39-44.
- [26] 杨昌华,杨宁.衡阳紫色土丘陵坡地微地形对土壤水分及生物量的影响.湖南生态科学学报,2014,1(4):16-21.
- [27] 田迅,高凯,张丽娟,于永奇,韩国栋.坡位对土壤水分及植被空间分布的影响.水土保持通报,2015,35(5):12-16.
- [28] 田月亮, 张金池, 李海东, 庄加尧, 叶立新, 刘胜龙. 不同林分类型土壤水分物理性质及其海拔效应——以浙江省凤阳山为例. 水土保持 通报, 2013, 33(1): 53-57, 61-61.
- [29] Goulden M L, Bales R C. Mountain runoff vulnerability to increased evapotranspiration with vegetation expansion. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(39): 14071-14075.
- [30] 张学礼,胡振琪,初士立.土壤含水量测定方法研究进展.土壤通报,2005,36(1):118-123.
- [31] 高丽,杨劼,刘瑞香.不同土壤水分条件下中国沙棘雌雄株光合作用、蒸腾作用及水分利用效率特征.生态学报,2009,29(11): 6025-6034.
- [32] Fox D M, Bryan R B, Price A G. The influence of slope angle on final infiltration rate for interrill conditions. Geoderma, 1997, 80(1/2): 181-194.
- [33] Moser K F, Ahn C, Noe G B. The influence of microtopography on soil nutrients in created mitigation wetlands. Restoration Ecology, 2009, 17 (5): 641-651.
- [34] 卫伟,余韵,贾福岩,杨磊,陈利顶. 微地形改造的生态环境效应研究进展. 生态学报, 2013, 33(20): 6462-6469.
- [35] Kamphorst E C, Jetten V, Guérif J, Pitkänen J, Iversen B V, Douglas J T, Paz A. Predicting depressional storage from soil surface roughness. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(5): 1749-1758.
- [36] Lu Y, Steele-Dunne S C, Farhadi L, Van De Giesen N. Mapping surface heat fluxes by assimilating SMAP soil moisture and GOES land surface temperature data. Water Resources Research, 2017, 53(12): 10858-10877.
- [37] 车宗玺,李进军,汪有奎,丁国民,李世霞,邸华,车宗彩,潘欣,毛志明,郭朝霞.祁连山西段草地土壤温度、水分变化特征.生态学报, 2018,38(1):105-111.
- [38] Zuazo V H D, Martínez J R F, Raya A M. Impact of vegetative cover on runoff and soil erosion at hillslope scale in Lanjaron, Spain. Environmentalist, 2004, 24(1): 39-48.
- [39] Gyssels G, Poesen J, Nachtergaele J, Govers G. The impact of sowing density of small grains on rill and ephemeral gully erosion in concentrated flow zones. Soil and Tillage Research, 2002, 64(3/4): 189-201.
- [40] Gyssels G, Poesen J. The importance of plant root characteristics in controlling concentrated flow erosion rates. Earth Surface Processes and Landforms, 2003, 28(4): 371-384.