

人工毛竹林土壤水分对气象因子的响应

陈明向^{1,2}, 翟禄新^{1,2*}, 阳 扬^{1,2}

(1. 广西师范大学环境与资源学院, 广西桂林 541004; 2. 珍稀濒危动植物生态与环境保护教育部重点实验室, 广西桂林 541004)

摘要 为研究土壤水分对气象因子的响应规律, 以广西猫儿山典型小流域的人工毛竹林地为研究区, 以定位观测的气象数据和 4 个测点的土壤水分进行典型相关分析, 结果表明, 在气象要素方面, 水汽压差 (VPD) 对 4 个点不同厚度的土壤水分 (SMC) 的影响最显著, 即 VPD 的波动最易导致土壤水分的变化。在影响时间方面, 4 个点中大体为土壤水分观测日前连续 4 d 的气象因子 (CMF) 对 SMC 影响最显著, 表明土壤水分的变化更多地受前 4 d 的气象条件的综合影响。各气象要素中降水量 (P) 与 CMF 呈正相关关系, 但影响不大, 表明土壤水分除受气象条件影响外, 植被则是另一主要影响因素。

关键词 土壤水分; 气象因子; 人工毛竹林; 生态水文学; 响应; 典型相关分析

中图分类号 S714 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2021)03-0072-04

doi: 10. 3969/j. issn. 0517-6611. 2021. 03. 020



开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

Responses of Soil Moisture to Meteorological Factors in Artificial Bamboo Forest

CHEN Ming-xiang^{1,2}, ZHAI Lu-xin^{1,2}, YANG Yang^{1,2} (1. School of Environment and Resources, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004; 2. Key Laboratory of Ecology of Rare and Endangered Species and Environmental Protection, Guilin, Guangxi 541004)

Abstract In order to study the response laws of soil moisture to meteorological factors, the artificial bamboo forests in typical small watershed of Mao'er Mountain, Guangxi Province were used as the research area, and the canonical correlation analysis was carried out based on the meteorological data of positioning observation and the soil moisture at 4 measuring points. The results showed that in terms of meteorological elements, soil moisture content (SMC) at four sites with different soil depth responds significantly to canopy meteorological factors (CMF), especially to water vapor pressure difference (VPD), namely most likely changing soil moisture content. In reference to influence time, CMF generally had the most significant impact on SMC at four sites before the nearly four observation days on the soil moisture content, which indicated that the change of soil moisture content was influenced mainly by the weather condition of the previous four days. Precipitation (P) of the meteorological elements was positively correlated with CMF, but the impact was not significant, indicating that the vegetation was another major impact factor, in addition to the effects of meteorological conditions on soil moisture content.

Key words Soil moisture; Meteorological factors; Artificial bamboo forest; Eco-hydrology; Response; Canonical correlation analysis

土壤水分是联系土壤、植被、大气系统中的关键一环。土壤水分在地球生物循环中起着至关重要的作用, 具体表现为通过限制植被蒸散与光合作用, 直接、间接影响植物分布与生长, 通过土壤蒸发、土壤侵蚀等过程来改变土壤环境^[1]。从农业角度看, 土壤水分是作物种植分布与生长的绝对性影响因子。从生态系统的角度, 土壤水分通过影响植被进而控制着生态系统的结构、功能与多样性^[2]。影响土壤水分的因素有很多, 如坡位、坡向等微地形因素^[3], 植被群落特征也是其重要影响因素^[4]。但在特定区域, 气象因素对其有主导作用^[5]。

有研究表明, 雨季地下相对较浅深度的土壤水分与太阳辐射、降雨量、风速、水汽压差、最高气温等气象因子相关性极显著, 相对较深土壤含水量变化的影响因素具有一定的相似性, 但与较浅层土壤含水量的主要影响因素和变化趋势均不同^[6], 即不同深度土壤水分对于气象要素的响应不同。研究农田土壤水分时, 分析得到气象因子对农田土壤水分的影响顺序, 其中日降水量成为对土壤水分影响的绝对性因素, 其次为平均风速、日照时数、日最低气温和日最高气温^[7-8]。也有研究结果表明, 日平均土壤温度和日平均相对湿度对土壤水分的影响最为明显, 贡献率最大, 但与日最高气温的相

关性不显著^[9]。降水尤其对浅层土壤有直接补充水分的作用^[10]。在干旱区, 气温对土壤水分的影响最明显, 降水次之。在半干旱区, 植被是影响土壤水分的绝对性因素, 在半湿润区植被对土壤水分的影响程度最大^[11]。这些研究结果表明, 土壤水分除受土壤质地和气候的差异影响外, 植被的差异应该是主要因素。

对不同时间尺度而言, 气象因子对土壤水分也有不同的影响。土壤水分呈现明显的季节变化, 且不同月份的主控因子不同^[12], 在月尺度上气象因子对土壤水分的影响更加显著, 在不同累积时段各气象因子对土壤水分影响各不相同^[13]。此外, 气象要素对土壤湿度的影响具有一定的滞后性, 在气温持续上升与下降时段, 降水达到一定程度时, 其他气象要素的变化无法改变土壤水分的上升趋势^[14]。即分析土壤水分变化时不仅要考虑当天的气象要素对土壤水分的影响, 还要考虑近期连续几天气象因子对土壤水分的综合影响。该研究以广西猫儿山毛竹 [*Phyllostachys heterocycla* (Carr.) Mitford cv. *Pubescens*.] 林为研究区, 运用典型相关分析法探讨土壤水分对综合气象因子的响应规律, 从而为认识和理解该区域的生态系统稳定性及其与水源涵养功能正常发挥的关系提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 研究区概况 研究区域位于广西壮族自治区东北部猫儿山下典型小流域的毛竹林地, 其地理坐标为 25°50'51.42"N、110°28'49.94"E, 属于中亚热带山地气候, 年均气温在

基金项目 国家自然科学基金项目 (41261005, 41867028)。

作者简介 陈明向 (1997—), 男, 黑龙江林甸人, 硕士研究生, 研究方向: 地表环境过程。* 通信作者, 副教授, 博士, 硕士生导师, 从事生态水文学研究。

收稿日期 2020-07-12

12.8℃,年降水量在2100mm以上,土壤为黄红壤;高程在432~496m,坡度在15°~30°,流域面积20.5hm²。流域内以毛竹为主,其间混有少量的杉木。此流域的毛竹为人工毛竹林,竹林密度较大,竹林内无人为垦耕地。猫儿山自然保护区的植被一方面对猫儿山整体生态建设与发展具有巨大作用,是猫儿山生态经济林发展的基础;另一方面,猫儿山处在桂林漓江的源头,植被的水源涵养功能对漓江流域旅游产业的发展具有一定的保障作用,对桂林市及其漓江流域水资源开发利用更是具有不可替代的作用。该区域的土壤和植被变化直接影响到自然保护区的生态系统稳定性及水源涵养功能的正常发挥,因此开展土壤水分变化研究具有重要意义。

在流域内随机选取4个立地条件相似、土层深厚且具有代表性的毛竹林地钻孔并安装土壤水分观测管,分别命名为2号、3号、6号和9号测点,均在坡腰或坡脚位置,其中2、6、9号点土壤水分观测深度均为140cm,3号点为130cm,观测深度和观测点与当地土层厚度一致。若以研究区域的中心为参考点,则9号点位于东坡腰深沟,6号点位于南坡平地,2号点位于西坡山脚,3号点位于西坡脚浅沟。

1.2 数据获取 选用土壤水分仪(型号为TRIME-PICO-IPH,德国制造)监测土壤水分,每个测点垂直相距10cm测一个土壤水分数据,总共4个测点,每间隔4~6d测量一次,监测时间为2016年1月4日—12月9日。

观测期间研究区每天的降水量与其他地面常规气象要素均来自FR210自动气象站。自动气象站观测项目有最高温度($T_{\max}$)、最低温度($T_{\min}$)、平均风速(W)、日总辐射(R_s)、日降水量(P)、相对湿度(RH)。水汽压差(VPD)由最高温度($T_{\max}$)、最低温度($T_{\min}$)、最大相对湿度($RH_{\max}$)、最小相对湿度($RH_{\min}$)计算得出^[15],即水汽压差(VPD)由饱和水汽压(e_s)与实际水汽压(e_a)差值得出:

$$VPD=e_s-e_a$$

(1)

其中,

$$e_s=\frac{e^0(T_{\max})+e^0(T_{\min})}{2}$$

(2)

$$e_a=\frac{e^0(T_{\min})RH_{\max}/100+e^0(T_{\max})RH_{\min}/100}{2}$$

(3)

式中, $e^0(T_{\max})$ 和 $e^0(T_{\min})$ 分别为最高气温和最低气温对应的水汽压。

$$e^0(T_{\max})=0.6108\exp\left[\frac{12.27T_{\max}}{T_{\max}+237.3}\right]$$

(4)

$$e^0(T_{\min})=0.6108\exp\left[\frac{12.27T_{\min}}{T_{\min}+237.3}\right]$$

(5)

1.3 数据处理方法 数据处理采用典型相关分析方法。典型相关分析用于揭示两组多元随机变量之间的关系,一组为自变量组,另一组是标准变量组。与其他相关统计方法相比,典型相关分析特别适合于所分析的标准变量组的各个变量之间本身具有较强的相关性^[16]。这种关系可表达为2个以上 X 变量与2个以上 Y 变量间的线性组合,使其简单相关达到最大。用方程式表示如下:

$$U=a_1y_1+a_2y_2+a_3y_3+\cdots+a_ky_k$$

(6)

$$W=b_1x_1+b_2x_2+b_3x_3+\cdots+b_kx_k$$

(7)

其中, U 、 W 为典型变量, a_i 、 b_j ($i,j=1,2,3,\cdots,k$)为线性组合的系数,也称典型权数。数据处理运用Matlab典型相关分析函数(canoncorr)进行运算。

数据划分为土壤水分和气象因子两组。其中土壤水分(soil moisture content, SMC)是以不同厚度进行分层并为一组子变量,在分析表达式中依次用 $y_1, y_2, \cdots, y_k$ 表示;冠层气象因子(canopy meteorological factors, CMF)由土壤水分观测日之前的气象观测的最高温度($T_{\max}$)、最低温度($T_{\min}$)、平均风速(W)、日总辐射(R_s)、日降水量(P)及计算的水汽压差(VPD)6个子变量组成。为反映气象因子对土壤水分的累积效应,重点考虑连续几天的气象要素的综合影响,如CMF中前1d的气象数据即土壤水分观测日前1d的气象要素,前2d气象数据取作用于相同土壤水分的前1d到前2d气象因子的均值($T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 、 W 、VPD)或累积值(R_s 、 P)。同上,前7d气象数据取前1~7d气象因子的均值或累积值。在分析表达式中依次用 $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ 表示。最后,以公式(6)、(7)中的系数 a_i 、 b_i 作为解释土壤水分对气象要素响应的主要变量。土壤剖面组合如表1所示。

表1 4个点土壤剖面组合

Table 1 Soil profile combination at 4 points

土壤厚度 Soil thickness cm	分层表示 Layered representation	土壤厚度 Soil thickness cm	分层表示 Layered representation
10	SM0~10...SM130~140	50	SM0~50...SM50~100
20	SM0~20...SM120~140	60	SM0~60...SM60~120
30	SM0~30...SM90~120	70	SM0~70...SM70~140
40	SM0~40...SM80~120		

表层土壤由于受降雨和地表径流的影响,土壤含水量波动较大,且浅厚度的土壤较难体现流域的整体情况,而在深层次土壤,由于植被根系、土壤性质的变化导致影响土壤水分的因素更复杂,故选取厚度40~60cm相对适中的土壤层进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同土壤水分组合对气象因子的响应 经对不同厚度土壤层的水分与气象因子进行典型相关分析,发现2号点厚度50cm时土壤水分对CMF响应最显著,由于深层土壤水分影响因素极其复杂,此点厚度分析只取100cm,即将SMC分为SM0~50和SM50~100两层。在典型相关表达式中,VPD前系数绝对值最大且大多为负,表明VPD对土壤水分的负作用最明显,占47.40%; P 系数符号为正,表明降水对土壤水分起正向作用,但贡献最小;而 $T_{\min}$ 、 W 、 R_s 除个别外大体上符号为负,表明所起作用是相反的,即促进土壤水分的消耗。

3号点结果表明,发现厚度40cm时土壤水分对CMF响应最显著。此点厚度分析取120cm,即将SMC分为SM0~40、SM40~80、SM80~120。在典型相关表达式中,VPD前系数绝对值最大,表明VPD对土壤水分作用最明显,占

60.39%; P 系数为正,表明降水对土壤水分起增加的作用;而 $T_{\min}$ 、 W 、 R_s 、VPD 前符号整体上与前者相反,表明四者对土壤水分有促进消耗的作用。

6 号点的情况则发现厚度 60 cm 时土壤水分对 CMF 响应最显著。此点厚度分析取 120 cm,即将 SMC 分为 SM0~60、SM60~120。在典型相关表达式中,VPD 前系数绝对值最大且都为负号,表明 VPD 对土壤水分的负作用最明显,占 63.88%; $T_{\max}$ 和 P 系数符号相同,表明所起作用相同,即有增加土壤水分的作用;而 $T_{\min}$ 、 W 、 R_s 除个别外大体上符号与前者相反,表明对土壤水分的消耗起一定的作用。

对于 9 号点而言,发现其厚度 50 cm 时土壤水分对 CMF 响应最显著。此点厚度分析取 100 cm,即将 SMC 分为 SM0~50、SM50~100。在典型相关表达式中,VPD 前系数绝对值最大且都为负号,表明 VPD 对土壤水分的负作用最明显,占 65.12%; $T_{\max}$ 和 P 系数符号相同,对土壤水分的表现为增加作用;而 $T_{\min}$ 、 W 、 R_s 除个别外大体上符号与前者相反,表明三者加强土壤水分的流失。

2.2 气象要素累积时间对土壤水分影响程度的比较 为分析土壤水分观测当日及其前几日气象要素的持续影响,对 1~7 d 的 CMF 与土壤水分进行典型相关分析。不同累积时间的综合气象因子对 4 个点厚度土壤影响最显著的累积时间典型相关系数结果如图 1 所示。

从图 1 可以看出,2 号点、3 号点、6 号点累积时段从前 1 d 到前 4 d,气象因子与厚度 50 cm 土壤水分的相关系数呈上升趋势,在累积前 4 d 的气象因子与土壤水分相关系数达到峰值,之后呈现逐渐下降趋势,即土壤水分观测日之前 4 d

的综合气象因子与 SMC 关系最密切,亦即影响最大。9 号点累积时段的增加对 50 cm 土壤水分整体上呈上升趋势,在累积前 7 d 时相关系数最大,前 4 d 时相关系数为 0.720 1,仍处于较高水平。综合来看,猫儿山人工毛竹林前 4 d 的综合气象要素对土壤水分的影响最显著。

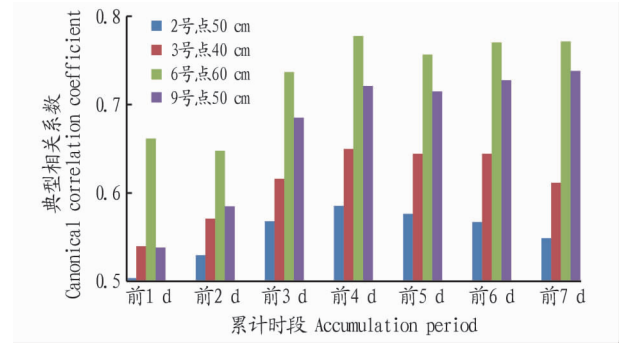


图 1 4 个点累积时间典型相关系数结果
Fig. 1 Canonical correlation coefficient results of the accumulation period of 4 points

2.3 综合气象要素对土壤水分的影响 4 个观测点前 4 d 累积时段典型变量表达式中不同气象因子前的系数,即公式(7)中的 b ,其中 R 为典型相关系数,如表 2 所示。从表 2 可以看出,在典型相关表达式中,4 个点中 VPD 前系数绝对值最大且大多为负,表明 VPD 对土壤水分的负贡献最明显,最多占比 65.12%,最少占比 47.40%。与 VPD 相比之下表现明显的气象因子为 W 、 $T_{\max}$ 。 P 系数符号为正,表明降水对土壤水分起正向作用,但贡献最小;而 $T_{\min}$ 、 W 、 R_s 除个别外大体上符号为负,即促进土壤水分的消耗。

表 2 4 个点气象因子累积前 4 d 典型相关分析结果
Table 2 Canonical correlation analysis results of 4 days before the accumulation of meteorological factors at 4 points

观测点 Observation point	$T_{\max}$	$T_{\min}$	W	R_s	P	VPD	R
2 号点 No. 2 point	0.255 0	-0.254 6	-0.503 9	-0.145 9	0.007 8	-1.533 1	0.584 3
3 号点 No. 3 point	0.488 3	-0.291 4	-0.236 5	-0.188 5	0.006 4	-3.335 3	0.648 7
6 号点 No. 6 point	0.174 2	-0.132 4	-0.401 6	-0.028 4	0.011 5	-2.447 3	0.776 6
9 号点 No. 9 point	0.168 5	-0.120 0	-0.137 2	-0.061 5	0.013 6	-2.069 5	0.720 1
平均 Mean	0.271 5	-0.199 6	-0.319 8	-0.106 1	0.009 8	-2.346 3	0.682 4

4 个观测点前 4 d 累积时段代表土壤水分 U 的典型变量表达式,即公式(6),2、3、6、9 点位累积前 4 d 的典型相关表达式分别为 $U=0.176 1y_1+0.308 1y_2$ 、 $U=0.031 9y_1+0.094 1y_2+0.257 4y_3$ 、 $U=0.149 4y_1+0.204 4y_2$ 、 $U=0.244 4y_1+0.245 3y_2$,可见较深厚土壤受气象因素影响较大,侧面表明此流域中土壤水分除受气象条件影响外,植被是另一主要影响因素。

3 讨论

从典型相关表达式中气象因子前面的系数来看,4 个观测点土壤水分均主要受 VPD 影响,只有 $T_{\max}$ 和 P 与土壤水分呈正相关关系。值得说明的是, $T_{\max}$ 理论上应该是与土壤水分反相关,此处出现正系数,应为统计学方法的局限性所致。从整体结果上看, P 前系数绝对值最小,这说明维持毛竹林系统水分除降水外,植被的作用不容忽视。在这些气象要素中,只有 VPD 表现比较稳定。VPD 为气温和相对湿度

的函数,即 VPD 综合反映了气温和相对湿度等动力学因素对植被盖度很高的土壤水分的影响,说明植被蒸腾消耗土壤水分方面占主导作用。

土壤水分受植被、气象、地形、人为活动等众多因素影响,具有时空尺度特征^[3,12,17-20]。研究得出,降水与土壤水分呈正相关关系,这与前人的研究结果一致^[7-8,19]。还测出气象因子对深层土壤水分影响较弱,这与余雷等^[21]的研究结果一致。在不同研究区域的土壤上,土壤水分与气象因子之间的关系也有差别,说明土壤水分的影响因素多且复杂。

地形因子对土壤水分有重要影响,它通过改变其他影响因素(如气候、植被)来影响土壤水分变化,在一定的条件下,地形可能形成独特的小气候,从而间接影响土壤水分的含量和分布。地形因子也可通过影响太阳辐射强度和降水的再分配来影响土壤水分含量^[22]。一般来说,对于小流域的土

壤水分研究,主要从坡位、坡向、坡度等地形因子进行探讨^[2,20,23]。坡向通过受太阳辐射程度的强弱来反映对土壤水分的变化^[24],一般情况下,同一流域中阳坡的含水量低于阴坡,主要是阴坡的太阳辐射热量低于阳坡,阴坡的蒸发蒸腾强度也低于阳坡,因此阴坡的土壤水分含量高于阳坡^[25]。

根系与土壤直接接触,对土壤中水分和养分的吸收起着至关重要的作用^[26]。有研究表明,毛竹细根比根长和根长密度随着土层深度的增加呈下降趋势^[27],其中根长密度可以在一定程度上反映单位体积内根系的吸收表面积,植物的根长密度越大,养分及水分吸收的表面积就越大;比根长越大的根,直径越细,根系的活力越强,吸收水分的能力就越强^[28],两者对土壤水分的变化有绝对性影响。也有研究证明土壤表层的比根长和根长密度较大,底层较小^[29]。该研究气象因子对4个点中不同厚度土壤的典型相关系数均值结果表明,随土壤厚度增加,气象因子对土壤水分的作用越明显,间接说明气象因子与根系对土壤水分影响有着密不可分的效果。

4 结论

该研究运用典型相关分析方法处理气象因子对土壤水分影响中有一定的优越性,得出以下结论:

(1)在气象要素对土壤水分的影响中,水汽压差是影响土壤水分最主要的气象因子,这表明该研究区域中植被是对土壤水分影响的主要因素。

(2)在累积时间的综合气象因子对土壤水分的影响中,土壤水分观测日前4d的综合气象因子对土壤水分影响较大。

参考文献

- [1] 韩新生,王彦辉,于澎涛,等.六盘山半干旱区华北落叶松林土壤水分时空变化与影响因素[J].水土保持学报,2019,33(1):111-117.
- [2] 李谦,郑锦森,朱青,等.太湖流域典型土地利用类型土壤水分对降雨的响应[J].水土保持学报,2014,28(1):6-11.
- [3] 田迅,高凯,张丽娟,等.坡位对土壤水分及植被空间分布的影响[J].水土保持通报,2015,35(5):12-16.
- [4] 濮阳雪华,王春春,苟清平,等.陕北黄土区植被群落特征与土壤水分关系研究[J].草业学报,2019,28(11):184-191.
- [5] 王素萍,张存杰,宋连春,等.多尺度气象干旱与土壤相对湿度的关系研究[J].冰川冻土,2013,35(4):865-873.
- [6] 黄志宏,周国逸,MORRIS J,等.桉树人工林冠层气象因子对雨季土壤水分的影响[J].热带亚热带植物学报,2003,11(3):197-204.
- [7] 张聪聪,陈效民,张勇,等.气象因子对太湖地区旱作农田土壤水分动

- 态的影响[J].中国农业科学,2013,46(21):4454-4463.
- [8] 张桂珍,高凯,张丽娟.扎鲁特旗山地草地土壤含水量动态与气候因子的关系[J].草业科学,2015,32(9):1399-1404.
- [9] 徐勇峰,郭俨辉,李淮,等.洪泽湖湿地杨树林土壤水分变化及其与气象因子的关系[J].浙江农林大学学报,2018,35(1):20-28.
- [10] 吴东丽,李琪,薛红喜,等.山东省土壤水分时空分布规律及分区[J].江苏农业学报,2019,35(3):639-645.
- [11] 魏宝成,玉山,贾旭,等.基于 AMSR-2 蒙古高原土壤水分反演及对气象因子响应分析[J].中国生态农业学报,2016,24(6):837-845.
- [12] 韩相云,景元书,李根.低丘红壤坡面土壤水分变化的气象因素冗余分析[J].生态学杂志,2013,32(9):2368-2374.
- [13] 刘士玲,杨保国,卢立华,等.广西大青山土壤热特征及其对气象要素的响应[J].中南林业科技大学学报,2018,38(11):46-52.
- [14] 何兴潼,袁淑杰,谷晓平,等.贵州省喀斯特区域土壤水分持续上升时期气象要素对土壤水分的影响[J].水土保持通报,2018,38(2):87-94.
- [15] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56[R]. Rome:FAO,1998.
- [16] 高惠璇.两个多重相关变量组的统计分析(1)(典型相关与典型冗余分析)[J].数理统计与管理,2002,21(1):57-64.
- [17] FU B J, WANG J, CHEN L D, et al. The effects of land use on soil moisture variation in the Danangou catchment of the Loess Plateau, China[J]. Catena,2003,54(1/2):197-213.
- [18] SENEVIRATNE S I, CORTI T, DAVIN E L, et al. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review[J]. Earth-science reviews,2010,99(3/4):125-161.
- [19] CHO E, CHOI M. Regional scale spatio-temporal variability of soil moisture and its relationship with meteorological factors over the Korean peninsula[J]. Journal of hydrology,2014,516:317-329.
- [20] 赫晓慧,温仲明.小流域地形因子影响下的土壤水分空间变异性研究[J].水土保持研究,2008,15(2):80-83,87.
- [21] 余雷,张一平,沙丽清,等.哀牢山亚热带常绿阔叶林土壤含水量变化规律及其影响因子[J].生态学杂志,2013,32(2):332-336.
- [22] 刘鑫,毕华兴,李笑吟,等.晋西黄土区基于地形因子的土壤水分分异规律研究[J].土壤学报,2007,44(3):411-417.
- [23] 葛翠萍,赵军,王秀峰,等.东北黑土区坡耕地地形因子对土壤水分和容重的影响[J].水土保持通报,2008,28(6):16-19.
- [24] 朱德兰,吴发启.不同地形部位土壤水分的年变化分析[J].中国水土保持科学,2003,1(4):28-31.
- [25] 何福红,黄明斌,党廷辉.黄土高原沟壑区小流域土壤水分空间分布特征[J].水土保持通报,2002,22(4):6-9.
- [26] CRAINE J M, LEE W G, BOND W J, et al. Environmental constraints on a global relationship among leaf and root traits of grasses[J]. Ecology,2005,86(1):12-19.
- [27] 刘广路,范少辉,蔡春菊,等.毛竹细根分布特征研究[J].热带亚热带植物学报,2017,25(5):472-479.
- [28] PREGITZER K S, LASKOWSKI M J, BURTON A J, et al. Variation in sugar maple root respiration with root diameter and soil depth[J]. Tree physiology,1998,18(10):665-670.
- [29] 程云环,韩有志,王庆成,等.落叶松人工林细根动态与土壤资源有效性关系研究[J].植物生态学报,2005,29(3):303-310.

(上接第71页)

- [11] 王帅.某铀矿区农田土壤重金属形态分析及其风险评价[D].南昌:东华理工大学,2017:47.
- [12] 万芹方,陈雅宏,胡彬,等.植物对土壤中铀的吸收与富集[J].植物学报,2011,46(4):425-436.
- [13] BAKER A J M, BROOKS R R. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements-A review of their distribution, ecology and phytochemistry[J]. Biorecovery,1989,1(2):81-126.
- [14] 沈振国,刘友良.重金属超量积累植物研究进展[J].植物生理学通讯,1998,34(2):133-139.
- [15] 宋照亮,朱兆洲,杨成.乌江流域石灰土中铀等元素形态与铀活性[J].长江流域资源与环境,2009,18(5):471-476.
- [16] GUO P R, DUAN T C, SONG X J, et al. Evaluation of a sequential extraction for the speciation of thorium in soils from Baotou area, Inner Mongolia[J]. Talanta,2007,71(2):778-783.

- [17] MARTÍNEZ-AGUIRRE A, GARCIA-LEÓN M, IVANOVICH M. U and Th speciation in river sediments[J]. Science of the total environment,1995,173/174:203-209.
- [18] 廉欢.黑麦草对铀污染土壤植物提取修复的根际效应研究[D].南昌:东华理工大学,2018:25.
- [19] ZHAO S L, LIAN F, DUO L. EDTA-assisted phytoextraction of heavy metals by turfgrass from municipal solid waste compost using permeable barriers and associated potential leaching risk[J]. Bioresource technology,2011,102(2):621-626.
- [20] DE LA ROSA G, PERALTA-VIDEA J R, CRUZ-JIMENEZ G, et al. Role of ethylenediaminetetraacetic acid on lead uptake and translocation by tumbleweed (*Salsola kali* L.) [J]. Environmental toxicology and chemistry,2007,26(5):1033-1039.
- [21] 霍文敏,赵中秋,王丽,等.不同超富集、富集植物-玉米间作模式对玉米中镉吸收、转运的影响研究[J].地学前缘,2019,26(6):118-127.