

河北坝上林田湖草土壤水盐氮分布与累积特征

李雅丽^{1,2}, Shiv O. Prasher³, 裴宏伟^{1,2}, 赵莉莉^{1,2}, 张红娟^{1,2}, 刘孟竹^{1,2}, 何延青^{1,2}

(1.河北建筑工程学院, 张家口 河北 075000; 2.河北省水质工程与水资源综合利用

重点实验室, 张家口 河北 075000; 3.加拿大麦吉尔大学 生物资源工程系, 魁北克 H9X3V9)

摘要: [目的] 探索干旱半干旱区土壤水盐氮的分布规律, 为防治地下水面源污染和实现水土资源可持续利用提供依据。[方法] 选取河北坝上地区 4 种典型的土地利用类型(林、田、湖、草), 分析土壤水分、盐分以及硝态氮的变化特征, 阐明不同土地利用类型土壤剖面的水盐氮分布规律。[结果] ①不同土地利用方式中, 安固里淖干涸湖底的土壤水盐含量最高, 平均含水率达 60.18%, 且土壤水盐分布均表现出中等变异性, 含水率变异程度更大。②林地、旱作农田和安固里淖干涸湖底 0—220 cm 土壤水盐分布规律基本一致, 分别呈振荡型、均匀型和底聚型, 而草地的水盐分布存在差异。③盐分离子在 4 种土地利用类型间均具有显著差异($p < 0.05$), 其构成以 SO_4^{2-} 为主, K^+ , Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 普遍缺乏。④安固里淖干涸湖底土壤剖面平均硝态氮含量高达 134.18 mg/kg, 在林地和旱作农田分布呈表聚型, 在安固里淖干涸湖底呈中间少、上下多的特征。草地硝态氮上层土壤累积明显。⑤林田湖草土壤硝态氮均与 K^+ 存在显著或极显著正相关, K^+ 是控制区域硝态氮变化的主要因子。[结论] 河北坝上林田湖草土壤水盐氮分布具有明显的差异性, 安固里淖干涸湖底土壤水盐氮含量显著高于其他 3 种土地利用类型, 对地下水造成严重的潜在污染。

关键词: 河北坝上; 土地利用; 水盐特征; 硝态氮; 地下水污染

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)01-0052-09

中图分类号: S153

文献参数: 李雅丽, Shiv O. Prasher, 裴宏伟, 等. 河北坝上林田湖草土壤水盐氮分布与累积特征[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 52-60. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.01.007; Li Yali, Shiv O. Prasher, Pei Hongwei, et al. Characteristics of soil water, salt and nitrogen distribution, and accumulation on forest land, cropland, playa and grassland in Bashang area of Hebei Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(1): 52-60.

Characteristics of Soil Water, Salt and Nitrogen Distribution, and Accumulation on Forest Land, Cropland, Playa and Grassland in Bashang Area of Hebei Province

Li Yali^{1,2}, Shiv O. Prasher³, Pei Hongwei^{1,2}, Zhao Lili^{1,2}, Zhang Hongjuan^{1,2}, Liu Mengzhu^{1,2}, He Yanqing^{1,2}

(1. Department of Municipal and Environmental Engineering, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou, Hebei 075000, China; 2. Hebei Key Laboratory of Water

Quality Engineering and Comprehensive Utilization of Water Resources, Zhangjiakou, Hebei

075000, China; 3. Department of Bioresource Engineering, McMill University, Quebec, Canada H9X3V9)

Abstract: [Objective] The distribution of soil water, salt and nitrogen in arid and semi-arid areas were analyzed in order to provide a basis for preventing and controlling non-point source pollution of groundwater and sustainably utilizing water and soil resources. [Methods] Four typical land use types (forest land, cropland, playa and grassland) in the Bashang area of Hebei Province were selected as the study objects. By analyzing changes in water, salt and nitrate of soils, we determined the distribution patterns of water, salinity, and nitrogen in the soil profiles of the different land use types. [Results] ① The soil water and salt content in the playa of Anguli Lake was the highest among the different land use types, with an average

收稿日期: 2022-03-03

修回日期: 2022-07-05

资助项目: 国家自然科学基金项目“北方农牧交错带典型集约菜田蒸散及水盐运移过程研究”(41701017); 河北省科技厅外专引智项目; 河北省自然科学基金项目(D2020404001); 河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2022015)

第一作者: 李雅丽(1995—), 女(汉族), 山西省阳泉市人, 硕士研究生, 研究方向为环境生态学。Email: l574542847@163.com。

通信作者: 裴宏伟(1987—), 男(汉族), 河北省张家口市人, 博士, 副教授, 主要从事生态水文和城市生态学研究。Email: hwpei@sjziam.ac.cn。

water content of 60.18%. The distributions of soil water and salt showed medium variability, with a greater degree of variability in water content. ② The same distributions of soil water and salt in the 0—220 cm soil profile were observed for forest land, farmland, and the playa (all except grassland) of Anguli Lake, exhibiting an oscillating shape, homogeneous shape, and bottom aggregation shape, respectively. ③ Saltions for the four land use types were significantly different ($p < 0.05$), and their compositions were dominated by SO_4^{2-} , while K^+ , Mg^{2+} and Ca^{2+} were relatively scarce. ④ The average nitrate content in the soil profile of the playa of Anguli Lake was as high as 134.18 mg/kg. Its distributions in forest land and farmland exhibited accumulation in topsoil, characterized by less in the middle and more at the top and bottom of the playa of Anguli Lake. The accumulation of nitrate in the upper soil layer of grassland was obvious. ⑤ The nitrate of soils of forest land, cropland, playa and grassland showed highly significant positive correlations with K^+ , which was the main factor that controlled the variation of nitrate. [Conclusion] The distributions of soil water, salt and nitrogen on forest land, cropland, playa and grassland in the Bashang area of Hebei Province had obvious variability, and the soil water, salt, and nitrogen content in the playa of Anguli Lake was significantly higher than seen for the other three land use types, thereby posing a serious risk of leaching to groundwater.

Keywords: Bashang area of Hebei Province; land use; soil water and salt; nitrate; groundwater pollution

土壤作为地球生态系统的核心要素,是联结岩石圈、水圈、大气圈与生物圈的重要纽带,也是人类赖以生存的重要基础资源^[1-2]。由于其形成与演变是五大成土因素和人类生产活动共同影响的结果,因此自然生态环境和人类活动方式的改变必然会引起土壤组成、性质以及结构发生相应的变化^[3]。在全球土地利用/植被覆盖变化剧烈的背景下,人类在生活与生产过程中对土地资源不合理的利用和管理将会导致土地退化、水土流失和土壤污染等问题时有发生,甚至会造成土壤盐渍化、荒漠化等现象,严重制约了当地社会生产力与经济的可持续发展^[4-5]。尤其在干旱半干旱区,土壤水分已成为影响整个生态系统结构与功能中的关键因子,其细微变化也将间接驱使土壤—植物体系发生物质流动与转化^[6]。明晰不同土地利用条件下的水分差异以及土壤盐分与硝态氮(NO_3^- -N)的响应程度,对于防控土壤退化和恢复生态环境具有重要的指导作用。

河北坝上地区位于华北平原与内蒙古高原的过渡地段,是典型的生态脆弱区,具有为首都涵养水源的重要生态功能^[7]。近年来,伴随着人类高强度的开发活动,区域内的土地利用格局发生了明显变化,土壤沙化、草场退化以及生态功能下降等问题日趋严重。同时,当地水资源供给也面临着巨大压力,出现了以安固里淖为代表的部分淖湖先后干涸的现象^[8-9]。水短缺引起的不合理灌溉、地下水超采以及过度施肥等使得土地退化状况愈加严峻,而土壤盐分和硝态氮作为表征土壤退化的重要指标之一,其随水分向下淋溶进入地下水,将会造成地下水水质恶化,

威胁人类的身体健康和生命安全^[10]。目前,学者们在该地区开展了不同土地利用方式对土壤理化性质^[11]、土壤侵蚀状况^[12]、土壤养分分布^[13]以及土壤微生物结构^[14]等方面的影响研究,而关于林田湖草等主要土地利用类型下土壤水盐氮特征的研究则不多见。因此,深入分析该地区不同土地利用方式下土壤水盐分布状况和硝态氮累积规律,对于合理规划当地水土资源至关重要。

近年来,已有研究表明土壤浸提液电导率可反映一定水分条件下土壤盐分的实际状态,因其操作简单、成本低等优点,已成为国际上广泛通用以评价土壤盐渍化程度的重要指标^[15]。本研究以河北省坝上地区 4 种土地利用类型(林地、农田、干涸湖底、草地)为研究对象,采用显著性检验和相关性分析方法,探讨不同土地利用方式土壤水分、电导率、各盐分离子以及硝态氮的分布与累积特征,厘清该地区土地利用变化对土壤质量的影响,以期防治河北坝上土壤盐渍化、荒漠化和地下水污染等生态问题提供理论依据,同时为当地山水林田湖草沙系统治理提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

河北坝上地区位于内蒙古高原南缘接壤($40^{\circ}57' - 41^{\circ}34' \text{ N}$, $114^{\circ}10' - 115^{\circ}27' \text{ E}$),是北方农牧交错带的典型地带。区域内安固里淖流域面积约 3 635 km^2 ,为华北第一大高原内陆湖,而目前已干涸近 20 a。研究区属中温带大陆性季风气候,具有冬季寒冷漫长,夏季凉爽少雨的气候特征,年平均日照时

数为 2 962.2 h, 平均气温 3.2 °C, 无霜期 90~110 d, 年平均降水量为 330~400 mm 且季节分布不均, 主要集中在夏季。研究区海拔高度为 1 201~2 104 m, 地貌类型可分为东南高原、西北丘陵和中部平原^[16]。主要土地利用类型为耕地(39.91%)、林地(28.24%)和草地(8.23%), 土壤类型以栗钙土为主。

1.2 样品采集与处理

本研究于 2021 年 5 月 22 日在张北县进行样品采集, 选取典型林地、旱作农田、安固里淖干涸湖底以及草地为采样点。利用土钻以 20 cm 间隔分层

取样, 当土壤质地发生明显变化时, 则以 10 cm 间隔取样。根据样点实际情况分别对林田湖草 4 种土地利用类型选择 2.2, 5.2, 2.6, 3 m 剖面深度, 共取得 70 份土样, 其中安固里淖干涸湖底和草地于 2.5 m 和 2.8 m 处出现地下水。记录各土层剖面形态特征以及样点周围环境状况(表 1), 将新鲜土样用铝盒和自封袋密封后, 立即运回河北建筑工程学院实验室进行土壤水分的测定, 其余土样经自然风干后, 剔除石块、植物根系等杂物, 研磨过 1 mm 筛后送到中国科学院节水农业重点实验室完成土壤盐分与硝态氮的测定。

表 1 研究区采样点基本特征

Table 1 Basic characteristics of sampling sites in the study area

土地利用类型	纬度	经度	采样点情况
安固里淖干涸湖底	41°19'22.37"	114°23'27.60"	表层覆有约 5 cm 厚的结皮, 无植被覆盖
草地	41°18'49.65"	114°24'6.29"	安固里淖干涸湖区内, 表层覆有低盖度的盐生草
林地	41°14'4.23"	114°42'18.65"	为杨树林地, 表层枯落物约 1 cm
旱作农田	41°13'59.77"	114°42'25.48"	种植油菜籽、裸燕麦等一年一熟作物

1.3 测定方法与分析

土壤含水率采用 110 °C 烘干法测定〔公式(1)〕。称取风干研磨后的土样 10 g, 加入 50 ml 的超纯水, 以 1:5 土水比混合振荡、过滤制得土壤浸提液。采用电导率仪测定滤液中的电导率, 接着用 0.45 μm 醋酸纤维素滤膜抽滤, 使用离子色谱仪(ICS-2 100)测定土壤可溶性离子(K⁺, Ca²⁺, Na⁺, Mg²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻-N)。运用 Excel 2019 和 SPSS 26.0 软件对数据进行整理分析, 比较不同土地利用方式下土壤盐分离子是否存在显著性差异采用 Kruskal-Wallis 检验, 并使用 Pearson 相关性分析法判断土壤硝态氮与盐分指标之间的关系, 显著性水平均取 0.05。作图利用 Origin 2017 软件完成。

$$\theta = \frac{M_0 - M_1}{M_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: θ 为土壤含水率(%); M_0 为新鲜土样的初始质量(g); M_1 为烘干后的干土质量(g)。

2 结果与分析

2.1 土壤水盐总体特征

干旱半干旱区植物生长发育所需的水分补给主要来源于自然降水和人为灌溉, 同时, 地下水埋深和大气凝结水也是水分的重要来源^[17]。盐分易随着水的下渗而淋失, 从而影响电导率在土壤剖面的分布^[18]。通过对不同土地利用方式下土壤各剖面的含

水率和电导率进行统计分析(表 2), 发现安固里淖干涸湖底的平均土壤含水率最高, 为 60.18%, 旱作农田(14.39%)和林地(12.61%)次之, 草地最低, 仅为 2.06%。安固里淖干涸湖底土壤质地黏重, 保水性能强, 且地下水埋深较浅, 使其土壤含水率最高。其余 3 个采样点表层覆盖的植被类型不同, 作物生长所消耗的土壤水分存在差异, 含水率在 2.06%~25.22% 之间。

其中草地的土质以砂土为主, 持水性能弱, 蒸发作用下使其土壤含水率最低。不同土地利用类型的电导率均值特征表现为: 安固里淖干涸湖底 > 草地 > 林地 > 旱作农田, 其中安固里淖干涸湖底显著高于其他土地利用类型的电导率, 平均值达 13.19 mS/cm 旁边草地的电导率也处于较高水平, 均值为 0.49 mS/cm。这是由于湖面干涸后, 湖中大量的富盐沉积物残留在土壤中, 导致大面积的土壤盐渍化。而在作物种植区, 植物通过吸收其生长所需的营养物质, 可降低土壤中的电导率。

变异系数(C_v)可以反映变量的离散程度。在整个土壤垂直剖面上, 4 种土地利用类型下土壤含水率和电导率均表现出中等变异性($0 < C_v < 1$), 且各利用方式含水率的变异程度均强于电导率。安固里淖干涸湖底的变异程度最强, 含水率和电导率分别在 19.22%~126.22% 和 3.9~26.6 mS/cm 范围内变化, 旱作农田的变异程度最弱。

表 2 不同土地利用方式下土壤含水率和电导率统计特征值

Table 2 Statistical characteristic values of soil water content and electrical conductivity under different land use types

土地利用类型	含水率/%					电导率/(mS·cm ⁻¹)				
	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数	最小值	最小值	平均值	标准差	变异系数
林地	6.04	25.22	12.61	5.70	0.45	0.10	0.26	0.19	0.05	0.26
旱作农田	8.44	25.13	14.39	5.36	0.37	0.14	0.26	0.18	0.03	0.19
安固里淖干涸湖底	19.22	126.22	60.18	37.72	0.63	3.90	26.60	13.19	7.64	0.58
草地	2.06	19.08	8.31	4.97	0.60	0.17	1.17	0.49	0.17	0.35

2.2 土壤水盐垂直分布规律

在同一土层深度下(0—220 cm),不同土地利用方式的土壤水盐垂直分布特征具有不同的特点(图 1)。安固里淖干涸湖底的含水率和电导率均呈现出随着土层深度的增加而升高的趋势,且在 190 cm 之后土壤分层淤积,出现了高含水率(81.51%~113.34%),这是由于其表层结皮阻碍了水分的蒸发,盐分不能随之上升到地表,湖底淤泥经过长久的沉积,使深层土壤水盐积聚明显。草地在 80—160 cm 土质为细黄沙,含

水率达到最低(2.06%~2.76%),随后 160—180 cm 分层为砂砾土,出现最高峰值(19.08%);其电导率在 0—100 cm 之间波动剧烈,主要由于蒸发强烈,土壤水分在毛管力的作用下向上流动,使盐分随之在上层土壤富集,而表层(0—20 cm)植物根系可吸收部分盐分,因此电导率较低。在旱作农田和林地利用方式下,含水率与电导率变化规律基本一致。受土壤质地变化的影响,林地土壤含水率和电导率呈明显的振荡型波动,而其在旱作农田中分布则较为均匀。

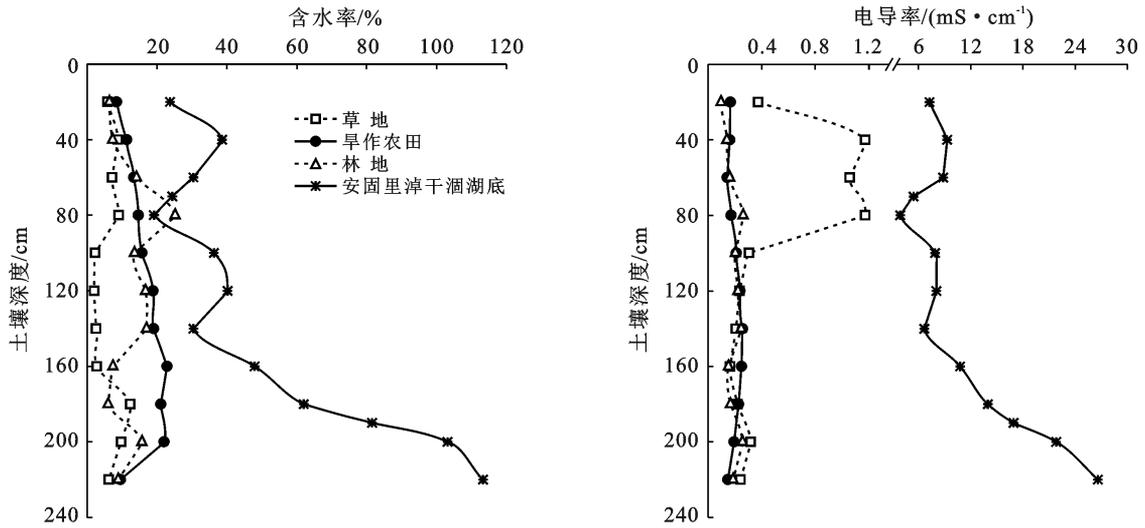


图 1 不同土地利用方式下土壤含水率和电导率垂直分布

Fig.1 Vertical distribution of soil water content and electrical conductivity under different land use types

2.3 土壤盐分离离子分布特征

土地利用方式对 0—220 cm 土壤盐分离离子分布存在显著差异的影响(表 3)。经非参数检验结果表明,安固里淖干涸湖底和草地的 Na⁺ 含量显著高于林地和旱作农田,最大相差约为 221 倍。安固里淖干涸湖底中 K⁺, Mg²⁺, Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 含量与其余土地利用类型均达到显著差异性水平(p<0.05),而 Ca²⁺ 含量与林地和旱作农田差异性并不显著(p>0.05)。草地中的 Ca²⁺ 含量显著低于其他 3 种利用类型,最低可达 0.007 g/kg,其主要原因为土壤胶体所吸附的 Ca²⁺ 易被高含量的 Na⁺ 交换进入土壤溶液中^[19],从而随水分流失。

对比研究区 4 种土地利用方式下盐分离离子垂直分布规律(图 2),发现除旱作农田以外,林地、安固里淖干涸湖底和草地的 Na⁺, Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 在整个土壤剖面上波动较大, K⁺, Mg²⁺ 和 Ca²⁺ 整体变化则较为平稳,呈均匀型分布,含量介于 0.002~1.574 g/kg 之间。林地剖面盐分离离子特征表现为: SO₄²⁻ > Cl⁻ > Ca²⁺ > Na⁺ > Mg²⁺ > K⁺, SO₄²⁻ 含量最大值(0.644 g/kg)出现在土壤表层,随着土层深度的增加,其波动逐渐平缓,160—180 cm 处达到最小值(0.084 g/kg)。旱作农田中 SO₄²⁻ 含量均值达 0.318 g/kg,高于其他盐分离子的 3.35~31.8 倍,且分布状态与林地较为相似,但最大峰值出现在 100~120 cm 处(0.98 g/kg)。

林田中 SO_4^{2-} 分布具有明显的分层富集特征, 呈现出由上而下逐渐降低的趋势。其原因在于林地表层的腐殖质和有机质含量较高, 有利于土壤中硫的累积。并且农田长期施用的磷肥中含有一定浓度的硫, 而作物对于硫的需求远低于氮、磷和钾等营养元素, 在降雨以及植物吸收等因素影响下, 大量的硫积聚在土壤

中并向下迁移, 呈现出规律性的波动态势。安固里淖干涸湖底和草地的 Na^+ , Cl^- 和 SO_4^{2-} 含量显著高于其他 3 种离子, 且变化趋势与电导率相同, 其在干涸湖底土壤分布中呈现出: $\text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{SO}_4^{2-}$, 而在草地中表现为: $\text{Na}^+ > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ 。综上所述, SO_4^{2-} 为研究区土壤盐分离子中的主要组成成分。

表 3 不同土地利用方式在 0—220 cm 土壤剖面盐分离子分布特征

Table 3 Characteristics of salt ions distribution in the 0—220 cm soil profile for different land use types

土地利用类型	$\text{Na}^+ / (\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	$\text{K}^+ / (\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	$\text{Mg}^{2+} / (\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	$\text{Ca}^{2+} / (\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	$\text{Cl}^- / (\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	$\text{SO}_4^{2-} / (\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$
林地	0.058 ± 0.030^a	0.017 ± 0.005^a	0.022 ± 0.010^a	0.091 ± 0.012^a	0.107 ± 0.086^a	0.251 ± 0.169^a
旱作农田	0.062 ± 0.026^a	0.010 ± 0.005^a	0.019 ± 0.006^a	0.095 ± 0.014^a	0.043 ± 0.026^a	0.318 ± 0.256^a
安固里淖干涸湖底	12.797 ± 7.821^b	0.284 ± 0.232^b	0.131 ± 0.109^b	0.235 ± 0.397^a	19.788 ± 12.853^b	8.704 ± 7.068^b
草地	0.558 ± 0.492^b	0.013 ± 0.008^a	0.012 ± 0.011^a	0.037 ± 0.028^b	0.403 ± 0.425^a	0.539 ± 0.735^a

注: 表中数据为平均值 ± 标准差; 同列中不同字母代表各离子在不同土地利用方式下间达到了 5% 的显著差异。

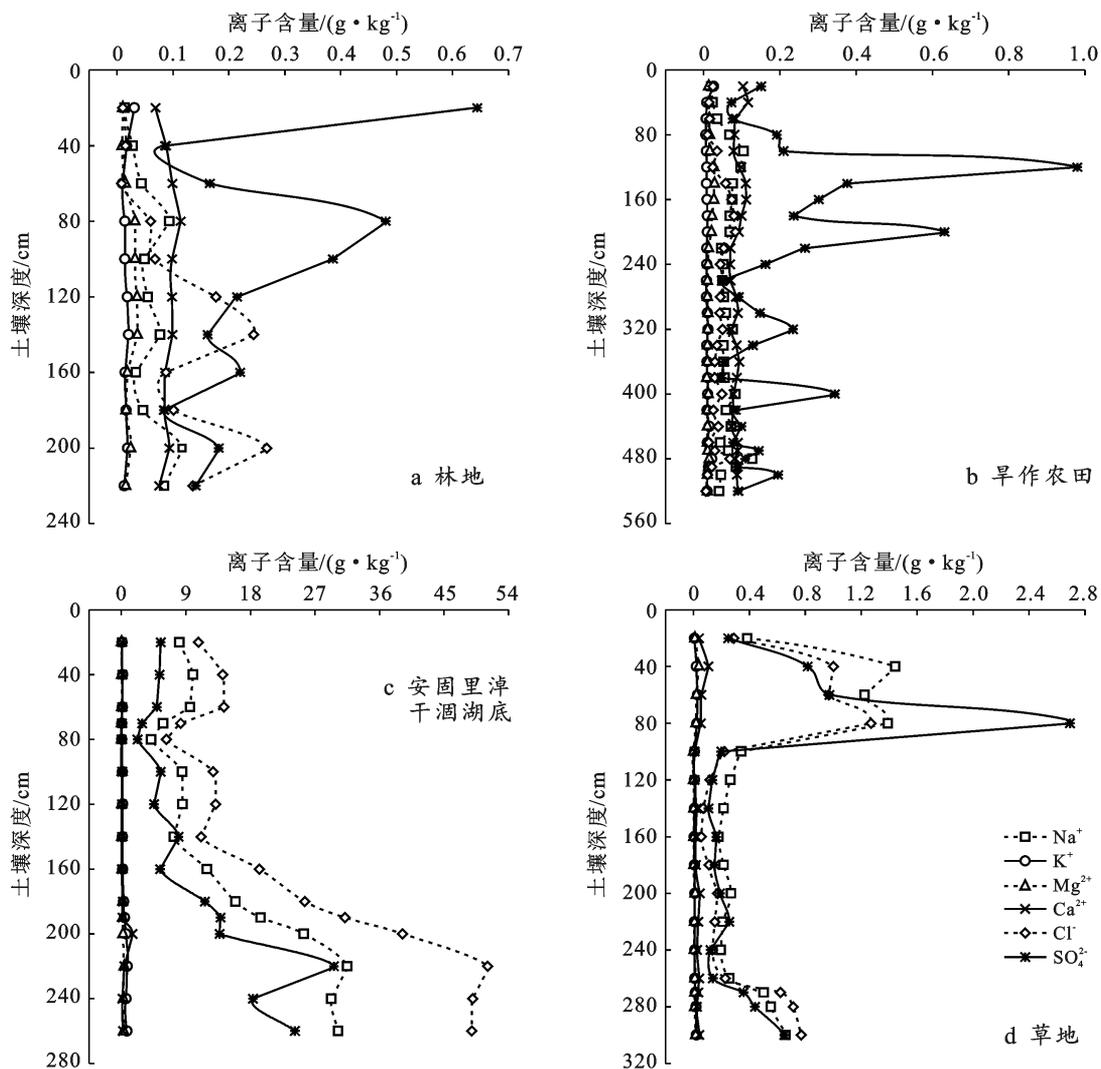


图 2 不同土地利用方式下土壤盐分离子垂直分布

Fig.2 Vertical distribution of soil salt ions under different land use types

2.4 土壤硝态氮累积特征

土壤中硝态氮作为速效性氮素, 可被植物根系所

吸收, 而不同土地利用方式会对土壤硝态氮的累积和分布特征产生影响^[20]。在浅层土壤(0—60 cm)和中

层土壤(60—140 cm)中(图 3),研究区各利用方式土壤硝态氮均值特征表现为:安固里淖干涸湖底>草地>旱作农田>林地,而深层土壤(140—220 cm)林地平均硝态氮含量(1.79 mg/kg)略高于旱作农田(1.57 mg/kg)。

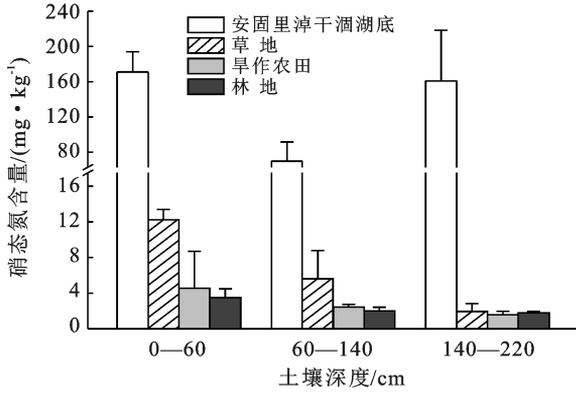


图 3 不同土地利用方式在 0—220 cm 土壤剖面下硝态氮分布特征

Fig.3 Characteristics of nitrate distribution in the 0—220 cm soil profile for different land use types

随着土层深度的增加,草地、林地和旱地硝态氮含量均减小,浅层土壤硝态氮累积明显。其中,草地

浅层土壤剖面硝态氮均值为 12.23 mg/kg,略高于世界卫生组织规定的饮用水标准 10 mg/kg,长期累积将会在降雨等因素下加剧向地下水淋溶的风险。安固里淖干涸湖底硝态氮主要聚集在浅层和深层土壤处,中层土壤硝态氮累积最少,但其均值(69.83 mg/kg)已远远高于饮用水的限定标准,存在严重的硝态氮淋失风险。

在整个土壤垂直剖面(图 4),林地和旱作农田土壤表层硝态氮含量最高,分别为 4.89 mg/kg 和 10.36 mg/kg,呈现“表聚型”分布。原因在于本研究采样时间为 5 月下旬,距离旱作农田施肥不久,且在坝上地区多雨时节之前,表层土壤良好的通气性更有利于促使硝化反应的发生,因此大量的硝态氮聚集在土壤表层,向深层土壤淋失较少。而草地土壤硝态氮含量最大值出现在 20—40 cm 处,为 13.39 mg/kg,这是由于在 0—20 cm 土层中,硝态氮作为营养物质被植物根系吸收和转化,仅有少量的硝态氮残留在土壤中。

安固里淖干涸湖底土壤硝态氮在垂直方向上分布不均,呈明显的凹凸态势。其含量介于 37.97~239.69 mg/kg 之间,最高峰值出现在 190~200 cm 湖底淤泥分层处。而样点地下水埋深为 2.5 m,土壤中大量的硝态氮可能已淋溶至地下水。

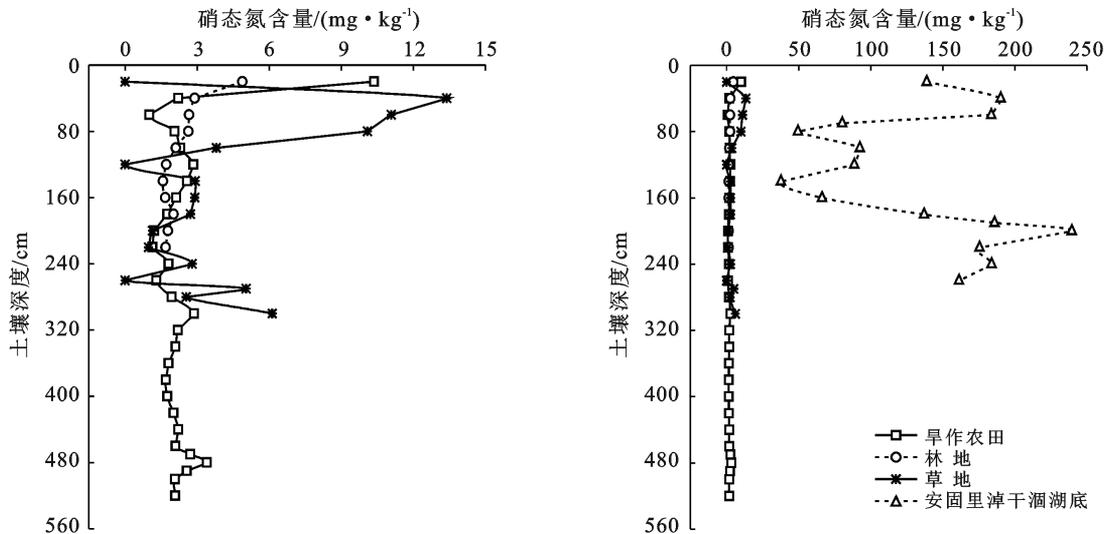


图 4 不同土地利用方式下土壤硝态氮垂直分布

Fig.4 Vertical distribution of soil nitrate under different land use types

分析不同土地利用类型硝态氮与盐分间的相关性,可一定程度上揭示硝态氮的迁移规律及形成原因^[21]。

在林地中(表 4),硝态氮与 K⁺, SO₄²⁻ 呈显著正相关,与 Cl⁻ 和电导率呈显著负相关,相关系数分别为 0.609, 0.698, 0.659, 0.629。而旱作农田中硝态氮只与 K⁺ 呈极显著正相关,相关系数达 0.787。安固里淖干涸湖底中硝态氮与各盐分指标均呈显著或极

显著正相关,其中与 Na⁺, K⁺ 和电导率呈极显著正相关,相关系数为 0.668, 0.641, 0.675。草地中硝态氮除与 SO₄²⁻ 呈显著正相关外,与其他指标均呈极显著正相关,其中与 Na⁺ 和电导率的相关性最大,相关系数均达到 0.9 以上,为 0.925, 0.901。综上表明,研究区中 K⁺ 作为植物生长发育所必需营养元素之一,对于土壤硝态氮的分布影响显著,是控制硝态氮含量变化的重要因素。

表 4 不同土地利用方式下土壤硝态氮与盐分指标间相关性

Table 4 Correlation between soil nitrate and salt indicators under different land use types

土地利用类型	指标	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻ —N	电导率
林地	Na ⁺	1							
	K ⁺	-0.264	1						
	Mg ²⁺	0.523	-0.121	1					
	Ca ²⁺	0.456	-0.477	0.733*	1				
	Cl ⁻	0.724*	0.094	0.582	0.179	1			
	SO ₄ ²⁻	-0.187	0.517	0.079	-0.036	-0.360	1		
	NO ₃ ⁻ —N	-0.553	0.609*	-0.527	-0.389	-0.659*	0.698*	1	
	电导率	0.879**	-0.285	0.837	0.757**	0.713*	-0.144	-0.629*	1
旱作农田	Na ⁺	1							
	K ⁺	0.108	1						
	Mg ²⁺	0.392*	-0.151	1					
	Ca ²⁺	-0.158	0.097	0.576**	1				
	Cl ⁻	0.433*	0.086	0.458*	0.021	1			
	SO ₄ ²⁻	0.389*	-0.139	0.712**	0.229	0.298	1		
	NO ₃ ⁻ —N	-0.160	0.787**	0.014	0.317	-0.133	-0.014	1	
	电导率	0.700**	0.104	0.851**	0.494**	0.557**	0.543**	0.100	1
安固里淖干涸湖底	Na ⁺	1							
	K ⁺	0.990**	1						
	Mg ²⁺	0.961**	0.973**	1					
	Ca ²⁺	0.487	0.531*	0.456	1				
	Cl ⁻	0.999**	0.987**	0.960**	0.455	1			
	SO ₄ ²⁻	0.945**	0.950**	0.970**	0.332	0.945**	1		
	NO ₃ ⁻ —N	0.668**	0.641**	0.581*	0.591*	0.640*	0.522*	1	
	电导率	1.000**	0.989**	0.960**	0.488	0.998**	0.940**	0.675**	1
草地	Na ⁺	1							
	K ⁺	0.885**	1						
	Mg ²⁺	0.866**	0.721**	1					
	Ca ²⁺	0.781**	0.608*	0.971**	1				
	Cl ⁻	0.945**	0.938**	0.783**	0.673**	1			
	SO ₄ ²⁻	0.811**	0.749**	0.541*	0.460	0.834**	1		
	NO ₃ ⁻ —N	0.925**	0.817**	0.811**	0.722**	0.842**	0.683*	1	
	电导率	0.988**	0.928**	0.864**	0.770**	0.979**	0.804**	0.901**	1

注: * 表示相关性显著($p < 0.05$); ** 表示相关性极显著($p < 0.01$)。

3 讨论

河北坝上地处干旱半干旱地区,由于其特定的水文地质环境,土壤水盐特征成为影响植被生长和分布的关键因素。反之,植物的生长和发育也会影响土壤水盐的分布状况^[22]。已有研究表明,近几年坝上地区生态环境功能虽有缓解的趋势,但大部分地区土壤退化的现象仍较为严重,防风固沙的能力相对较弱^[23]。掌握土壤水盐分布特征和影响因素,对于区域土壤盐渍化的防控具有重要作用。本文以人工林地、旱作农田以及自然状态下的草地和安固里淖干涸湖底作为研究对象,阐明了土壤的水盐分布与变化规律。总体来看,天然植被覆盖的土壤盐分高于人工植被,这与前人在渭库绿洲^[24]、黄河三角洲^[25]地区研究结果一致,表明人工种植可一定程度上改良土壤盐渍化,主要原因是表面较高的植物覆盖度会抑制盐分从土壤

底部上升,且较强的人为干预也会改善盐分富集状况。因此,在盐碱地进行适当的人类活动可防治土壤盐渍化。研究区土壤盐分离子组成中,SO₄²⁻ 占据重要位置,特别是在林地和旱作农田中,分别占 6 种可溶性盐分离子总量的 45.97% 和 58.14%。而在安固里淖干涸湖底和草地中,可溶盐离子则以 Na⁺, Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 为主,与袁磊等^[26] 在该地区得出的结论一致。同时,在新疆艾比湖干涸湖底^[27] 的相关研究中,相关学者也得出了相似结论,表明干涸湖底主要的盐分物质组成为 NaCl 和 Na₂SO₄。

近年来,地下水污染问题已成为全球范围内的研究热点。其中,氮素淋失是农业面源污染的重要形式之一,土壤中硝态氮累积作为表征氮素淋失风险的主要指标,土地利用变化将会影响其在土壤中的分布^[28]。研究表明,不同土地利用类型的土壤硝态氮累积存在显著差异,其向深层土壤迁移引发的地下水污

染风险程度各异^[29]。植物的根系多分布在 0—40 cm, 60 cm 以下的硝态氮则很难被作物吸收利用。本研究中,林地和旱作农田 60 cm 以下土壤硝态氮累积均值分别为 1.9 mg/kg 和 2.11 mg/kg,并未超过世界卫生组织规定的饮用水标准(10 mg/kg)。然而,据笔者 2021 年在张北县对 7 个蔬菜种植区旁的自备井水样检测后发现:地下水硝态氮平均浓度为 16.62 mg/L,超标率达 42.86%。这表明若长期过量施用肥料,将会导致土壤中硝态氮的大量积聚,并随着时间的推移不断地向深层淋溶进而对地下水造成硝态氮污染。因此,应进行适当的缓控释肥以有效降低土壤中硝态氮的累积量。安固里淖干涸湖底深层土壤硝态氮均值含量达到 160.99 mg/kg,远超出饮用水标准,已经构成地下水硝态氮潜在污染源,这与吴庭雯等^[30]对安固里淖内陆河流域地下水硝酸盐污染结果相同,区域内频繁的工农业生产活动是导致地下水硝酸盐污染的重要原因,该区地下水环境问题亟待解决。

4 结论

(1) 研究区不同土地利用方式土壤水盐分布有明显差异,安固里淖干涸湖底土壤含水率(60.18%)与电导率(13.19 mS/cm)均值最高;4 种利用方式土壤剖面含水率和电导率均呈中等变异性,且含水率的变异程度强于电导率;在 0—220 cm 土层中,林地、旱作农田和安固里淖干涸湖底土壤含水率与电导率分布一致,分别呈振荡型、均匀型和底聚型;草地含水率分布较均匀,而电导率富集在上层土壤且波动剧烈。

(2) 0—220 cm 土层 Na^+ 在安固里淖干涸湖底、草地与林地、旱作农田之间差异性显著($p < 0.05$), K^+ , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} 在安固里淖干涸湖底与其他土地利用方式间均达到显著性差异,草地 Ca^{2+} 与其余 3 种利用方式呈显著差异;研究区盐分离子组成以 SO_4^{2-} 为主, K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} 含量较低;林地、旱作农田 SO_4^{2-} 分布呈分层富集态势,整体随土层深度增加而降低;安固里淖干涸湖底、草地中 Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} 含量最高,均与其电导率的分布规律大致相同。

(3) 土壤硝态氮平均含量从高到低依次为安固里淖干涸湖底(128.26 mg/kg)、草地(4.46 mg/kg)、旱作农田(2.7 mg/kg)、林地(2.33 mg/kg),安固里淖干涸湖底具有严重的淋失风险;林地和旱作农田土壤剖面硝态氮分布呈表聚型,安固里淖干涸湖底硝态氮分布上下多,中间少,草地硝态氮与电导率分布规律基本一致;4 种土地利用方式土壤硝态氮均与 K^+ 呈显著或极显著正相关, K^+ 对于研究区土壤硝态氮的分布和变化具有重要的作用。

[参 考 文 献]

- [1] 柳菲,陈沛源,于海超,等.民勤绿洲不同土地利用类型下土壤水盐的空间分布特征分析[J].干旱区地理,2020,43(2):406-414.
- [2] Doran J W, Sarrantonio M, Liebig M A. Soil health and sustainability [M] // *Advances in Agronomy*. Amsterdam: Elsevier, 1996:1-54.
- [3] 阿斯耶姆·图尔迪,李新国.开都河下游灌区不同土地利用类型土壤质地与土壤盐分关系探讨[J].干旱地区农业研究,2014,32(6):176-182.
- [4] Turner M G. Landscape ecology: The effect of pattern on process [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1989,20:171-197.
- [5] 吴文斌,杨鹏,唐华俊,等.土地利用对土壤性质影响的区域差异研究[J].中国农业科学,2007,40(8):1697-1702.
- [6] Ding Jingyi, Daryanto S, Wang Lixin, et al. The spatial distribution and temporal variation of desert riparian forests and their influencing factors in the downstream Heihe River Basin, China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017,21(5):2405-2419.
- [7] Liu Mengzhu, Min Leilei, Zhao Jingjing, et al. The impact of land use change on water-related ecosystem services in the Bashang area of Hebei Province, China [J]. *Sustainability*, 2021,13(2):716.
- [8] 裴宏伟,杨佳,张红娟,等.变化环境下清水河流域径流演变特征及驱动力[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(2):1-13.
- [9] 赵望龙,郭中领,王仁德,等.安固里淖干涸湖土壤理化因子空间分布特征[J].湿地科学,2016,14(4):553-560.
- [10] 梁慧雅,王仕琴,魏守才.华北山前平原典型厚包气带硝态氮分布累积规律[J].土壤,2017,49(6):1179-1186.
- [11] 王红营,郭中领,王仁德,等.河北坝上植被恢复措施对土壤性质的影响[J].水土保持研究,2016,23(5):74-79.
- [12] 杨钦,郭中领,王仁德,等.河北坝上不同土地利用方式对土壤风蚀的影响[J].干旱区资源与环境,2017,31(2):185-190.
- [13] 张怡颖,谷丰,刘泉,等.华北农牧交错带不同土地利用类型的土壤养分特征:以张北县为例[J].草业科学,2020,37(7):1239-1248.
- [14] 乔赵崇,赵海超,黄智鸿,等.冀北坝上不同土地利用对土壤微生物量碳氮磷及酶活性的影响[J].生态环境学报,2019,28(3):498-505.
- [15] 付秋萍,张江辉,王全九,等.塔里木盆地土壤盐分变化特征分析[J].自然科学进展,2007,17(8):1091-1097.
- [16] Huang An, Xu Yueqing, Liu Chao, et al. Simulated town expansion under ecological constraints: A case study of Zhangbei County, Heibei Province, China [J]. *Habitat International*, 2019,91(1):101986.
- [17] 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.
- [18] 窦超银,康跃虎,万书勤.地下水浅埋区重度盐碱地覆膜咸水滴灌水盐动态试验研究[J].土壤学报,2011,48(3):524-532.
- [19] 李银科,马全林,王耀琳,等.景电灌区次生盐渍化土地枸杞林的土壤特征研究[J].草业学报,2015,24(5):66-74.
- [20] 李亚娟,王亚亚,曹广民,等.三江源区土地利用方式对土壤氮素特征的影响[J].干旱地区农业研究,2017,35(3):272-277.
- [21] 王云强,张兴昌,李顺姬,等.小流域土壤矿质氮与地形因子的关系及其空间变异性研究[J].环境科学,2007,28(7):1567-1572.
- [22] Yin Xinwei, Feng Qi, Zheng Xinjun, et al. Spatio-temporal dynamics and eco-hydrological controls of water and salt migration within and among different land uses in an oasis-desert system [J]. Science of the Total Environment, 2021,772:145572.
- [23] 王彦芳,裴宏伟.1980—2015 年河北坝上地区生态环境状况评价与对策研究[J].生态经济,2018,34(1):186-190.
- [24] 王雪梅,康璇,赵枫.不同土地利用方式下渭一库绿洲土壤盐渍化特征分析[J].水土保持研究,2016,23(1):160-164.
- [25] Yu Junbao, Li Yunzhao, Han Guangxuan, et al. The spatial distribution characteristics of soil salinity in coastal zone of the Yellow River Delta [J]. Environmental Earth Sciences, 2014,72(2):589-599.
- [26] 袁磊,吴庭雯,韩双宝,等.内蒙古高原内流区土壤水溶盐空间变异特征及其影响因素[J].西北地质,2021,54(4):192-198.
- [27] 吉力力·阿不都外力,米热班·阿布里米提,刘东伟,等.艾比湖干涸湖底不同景观类型下富盐沉积物盐分积聚特征[J].中国沙漠,2013,33(5):1426-1432.
- [28] Yimer F, Ledin S, Abdelkadir A. Changes in soil organic carbon and total nitrogen contents in three adjacent land use types in the Bale Mountains, South-eastern Highlands of Ethiopia [J]. Forest Ecology and Management, 2007,242(2/3):337-342.
- [29] 马林,王洪媛,刘刚,等.中国北方农田氮磷淋溶损失污染与防控机制[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(1):1-10.
- [30] 吴庭雯,袁磊,韩双宝,等.安固里淖内陆河流域地下水硝酸盐污染时空分布特征及成因分析[J].环境化学,2021,40(8):2515-2523.

(上接第 51 页)

- [9] 倪九派,袁天泽,高明,等.土壤干密度和含水率对 2 种紫色土抗剪强度的影响[J].水土保持学报,2012,26(3):72-77.
- [10] 胡斐南,魏朝富,许晨阳,等.紫色土区水稻土抗剪强度的水敏性特征[J].农业工程学报,2013,29(3):107-114.
- [11] 史炳林.紫色土坡耕地埂坎土壤抗剪特征研究[D].重庆:重庆师范大学,2017.
- [12] 郭进,文安邦,严冬春,等.三峡库区紫色土坡地土壤颗粒流失特征[J].水土保持学报,2012,26(3):18-21.
- [13] 李江文,冉卓灵,韩珍,等.含岩屑紫色土水分扩散规律[J].水土保持学报,2020,34(1):178-185.
- [14] 孙丽丽,查轩,黄少燕,等.不同降雨强度对紫色土坡面侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2018,32(5):18-23.
- [15] 夏振尧,张伦,牛鹏辉,等.干密度初始含水率坡度对紫色土崩解特性的影响[J].中国水土保持科学,2017,15(1):121-127.
- [16] 王文武.不同坡度下紫色土坡耕地土壤侵蚀演变特征[D].四川雅安:四川农业大学,2019.
- [17] 李达,汪时机,李贤,等.非饱和砂质黏性紫色土一维渗透特性试验研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(2):373-380.
- [18] 宁宝宽,王宇暘,陈四利,等.水泥尾矿砂土的应力渗流耦合特性试验[J].水文地质工程地质,2015,42(4):74-78.
- [19] Lili M, Bralts V, Yinghua P, et al. Methods for measuring soil infiltration: State of the art [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2008,1(1):22-30.
- [20] 谢君,杜静,刘芸.重庆紫色土棚的有效性及其影响因素分析[J].西南师范大学学报(自然科学版),2011,36(2):153-157.
- [21] 周萍,文安邦,严冬春,等.三峡库区紫色土坡耕地草本地埂植物根系分布及抗拉力学特征[J].水土保持通报,2017,37(3):1-6.
- [22] 王晓菊,毛海涛,黄庆豪,等.基于 Copula 函数的三峡库区万州段蓄水前后降雨量—径流量关系分析[J].水资源与水工程学报,2021,32(2):23-30.
- [23] 中华人民共和国水利部.GB/T 50123-2019 土工试验方法标准[M].北京:中国计划出版社,2019.
- [24] 常松果.红壤坡耕地耕层土壤抗剪强度及影响因素响应特征[D].重庆:西南大学,2017.
- [25] 梁广川.不同因素对重庆紫色土土—水特征曲线的影响研究[D].重庆:西南大学,2020.
- [26] 程鹏,李锦辉,宋磊.生态边坡的水力和力学特性分析:试验研究[J].岩土工程学报,2017,39(10):1901-1907.
- [27] 韦杰,史炳林,李进林.紫色土坡耕地埂坎土壤抗剪性能对含水率的响应[J].农业工程学报,2016,32(20):153-160.
- [28] 梁广川,汪时机,李贤,等.砂质黏性紫色土渗透特性试验研究[J].岩土工程学报,2018,40(S2):220-224.