

坡向对切挖边坡土壤钾素特征的影响

王雪, 杨斯茜, 张易帆, 艾应伟

(四川大学生命科学学院 生物资源与生态环境教育部重点实验室, 成都 610065)

摘要: 为探究切挖边坡土壤钾素及其组分的空间分布规律, 采用野外采样和实验室分析相结合的方法, 以四川省阿坝州松潘县川黄高速公路的切挖边坡为研究对象, 对比不同坡向间土壤各形态钾素含量的差异, 分析不同形态钾素与土壤理化性质的相关性, 明确土壤有效钾的影响因素。结果表明: 土壤水溶性钾、非特殊吸附钾、特殊吸附钾、速效钾和非交换性钾含量均表现为阳坡>阴坡, 而土壤矿物钾和全钾含量则表现为阳坡<阴坡; 土壤所有形态钾素含量均表现为半阳坡>半阴坡。土壤非特殊吸附钾、特殊吸附钾和速效钾与土壤 pH、全氮、碱解氮均达到显著或极显著正相关。土壤 pH 是影响切挖边坡土壤有效钾的主要因素, 水溶性钾、非特殊吸附钾对切挖边坡土壤有效钾的贡献较大。

关键词: 切挖边坡; 坡向; 土壤钾素

中图分类号: S154.1; S158.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2023.026003

Influence of slope aspect on soil potassium characteristics of cut slopes

WANG Xue, YANG Si-Qian, ZHANG Yi-Fan, AI Ying-Wei

(Key Laboratory of Bio-Resources and Eco-Environment of Ministry of Education,
College of Life Sciences, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to explore the spatial distribution law of soil potassium and its components in excavated slopes, a combination of field sampling and laboratory analysis was used. The cut slopes of Chuan-huang Expressway in Songpan County, Aba Prefecture, Sichuan Province were selected as the research objects, the differences in soil potassium content between different slope aspects were compared, and the correlation between different forms of potassium and soil physical and chemical properties was analyzed, the influencing factors of soil available potassium were clarified. The results showed that the contents of soil water-soluble potassium, non-specially adsorbed potassium, specially adsorbed potassium, rapidly-available potassium and non-exchangeable potassium in the soil were all in the order of sunny slope > shady slope, while soil mineral potassium and total potassium contents were in the order of sunny slope < shady slope. The content of soil potassium in all forms showed the order of semi-sunny slope > semi-shady slope. Soil non-specially adsorbed potassium, specially adsorbed potassium and rapidly-available potassium was significantly or extremely significantly positively correlated with soil pH, total nitrogen, and alkaline hydrolyzed nitrogen. Soil pH is the main factor affecting soil available potassium, and water-soluble potassium and non-specially adsorbed potassium have a greater contribution to the soil available potassium of cut slopes.

Keywords: Cut slope; Slope aspect; Soil potassium

收稿日期: 2022-04-11

基金项目: 国家自然科学基金(41971056); 国家重点研发计划课题(2017YFC0504903)

作者简介: 王雪(1997-), 女, 陕西宝鸡人, 硕士研究生, 研究方向为修复生态学. E-mail: 18792998673@163.com

通讯作者: 艾应伟. E-mail: aiyw99@sohu.com

1 引言

在山区修建公路经常会对山体进行开挖,从而形成了大量的裸露边坡.这不仅会破坏坡面的土壤结构,导致土壤养分流失,而且会降低土壤的抗蚀性,极易引发滑坡、泥石流等地质灾害^[1].坡向是山地主要的地形因子之一.不同坡向由于光照时间和强度、温度、风力作用等存在差异,会造成坡面土壤养分含量的不同,从而对土壤肥力和质量产生影响,进而导致植物生长发育、种群的组成和分布也有很大区别^[2,3].钾是植物必需的营养元素,土壤是植物钾素的主要来源,其供钾能力直接对植物的生长状况产生影响^[4].土壤钾素有多种存在形态,且不同形态之间存在动态转化,而土壤钾素的有效性由各形态钾素的分布特征及其转化程度等共同决定^[5].土壤钾素形态可分为速效钾(水溶性钾、非特殊吸附钾、特殊吸附钾)、缓效钾(非交换性钾)和相对无效钾(矿物钾)^[6,7].然而,以往关于切挖边坡的研究多集中于土壤碳氮磷,虽然坡向对边坡恢复的影响已有研究,但针对不同坡向切挖边坡土壤钾素分布特征的研究涉及较少.因此,研究不同坡向下各形态土壤钾素的分布特征可以为切挖边坡土壤养分循环及生态修复提供科学依据.

2 材料与方法

2.1 研究样地选取

研究样地位于四川省阿坝藏族羌族自治州松潘县川黄高速公路(S301)的九黄机场连接线($103^{\circ}39'E\sim 103^{\circ}40'E$, $32^{\circ}49'N$),2003 年修建,2013 年改建,全长 94.14 km.切挖边坡采用客土喷播技术进行生态修复,坡面植物主要包括一年生早熟禾(*Poa annua* L.)、披碱草(*Elymus dahuricus* Turcz.)、紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.).土壤类型主要为亚高山草甸土,植被类型以高山草甸为主.

2.2 土壤样品采集与处理

2018 年 9 月在 S301(九黄机场连接线)选取四个不同坡向(阳坡、阴坡、半阳坡、半阴坡)的切挖边坡,坡度均为 40° 左右,坡面长度约为 15 m,分别采集土壤样品,每个处理均设 3 次重复.每个重复的土壤样品按照 S 形取样法,随机采取 25 个采样点 0~10 cm 的表层土壤混合而成.将采集的所有土壤样品装入聚乙烯自封袋带回实验室经自然风干后,捡去杂质,研磨过筛后用于化学测定.

2.3 土壤样品的测定

土壤 pH 值:电位法(水土比 2.5 : 1);土壤含水量(SWC):烘干称重法;土壤有机质(SOM): $H_2SO_4-K_2Cr_2O_7$ 氧化法;土壤全氮(TN):凯氏定氮法;土壤碱解氮(AN):碱解扩散法.

土壤钾形态分级^[6]:速效钾(RAK)用 $1\text{ mol}\cdot L^{-1}$ 中性 NH_4OAc 浸提,水溶性钾(WSK)用去离子水浸提,非特殊吸附钾(NSAK)用 $0.5\text{ mol}\cdot L^{-1}$ 中性 $Mg(OAc)_2\cdot 4H_2O$ 浸提钾-水溶性钾,特殊吸附钾(SAK)用 NH_4OAc 浸提钾- $Mg(OAc)_2\cdot 4H_2O$ 浸提钾,非交换性钾(NEK)用 $1\text{ mol}\cdot L^{-1}$ 热 HNO_3 浸提钾- NH_4OAc 浸提钾,全钾(TK)用 NaOH 熔融,矿物钾(MK)用全钾-热 HNO_3 浸提钾.各级钾的浸提液均用火焰光度计测定.

2.4 数据处理

采用 Excel 和 SPSS 26.0 进行数据统计分析.

3 结果与分析

3.1 不同坡向切挖边坡土壤钾素含量

如表 1 所示,坡向对切挖边坡土壤 TK 和 MK 含量有显著影响($P<0.05$),对其它形态钾素含量均有极显著影响($P<0.01$).土壤 TK、MK 含量总体表现为:阴坡>半阳坡>半阴坡>阳坡.阳坡、半阳坡和半阴坡的土壤 TK、MK 含量差异不显著,三者与阴坡均有显著差异($P<0.05$).土壤 WSK、NSAK、RAK 含量总体表现为:半阳坡>阳坡>阴坡>半阴坡.阳坡和阴坡的土壤 WSK 含量无显著差异,二者均与半阳坡、半阴坡差异显著($P<0.05$).不同坡向的土壤 NSAK 含量均有显著差异($P<0.05$).半阴坡与阴坡的土壤 RAK 含量无显著差异($P>0.05$).土壤 SAK 含量在阳坡最高,阴坡最低,半阳坡土壤 SAK 含量高于半阴坡.半阳坡与阳坡、半阴坡的土壤 SAK 含量无显著差异($P>0.05$).土壤 NEK 含量总体表现为:阳坡>阴坡>半阳坡>半阴坡.阴坡与阳坡、半阳坡的土壤 NEK 含量均无显著差异($P>0.05$).

3.2 不同坡向切挖边坡土壤理化性质

如表 2 所示,土壤 pH 值变化范围为 7.96~8.88,属于碱性土壤,总体表现为阴坡>阳坡>半阳坡>半阴坡.阳坡和半阳坡的土壤 pH 差异不显著,但二者与半阳坡和半阴坡之间有显著差异($P<0.05$).SWC 范围为 0.42%~0.69%,总体表现为:半阳坡>半阴坡>阳坡>阴坡.阴坡的 SWC 显著低于其它三个坡向($P<0.05$).SOM、TN 和

AN 含量总体表现为:半阳坡>阳坡>半阴坡>阴坡、阴坡和半阴坡($P<0.05$). 半阴坡与阴坡的土壤 AN 含量差异不显著($P>0.05$).

表 1 不同坡向切挖边坡土壤钾素含量

Tab. 1 Soil potassium content of cut slopes with different slope aspects

	阳坡	半阳坡	半阴坡	阴坡	F 值
TK (g · kg ⁻¹)	21.56±1.43b	22.48±0.39b	22.26±0.40b	24.20±0.37a	6.032*
WSK (mg · kg ⁻¹)	17.27±3.21b	23.69±3.15a	4.39±0.01c	17.22±3.17b	25.979**
NSAK(mg · kg ⁻¹)	62.08±19.21b	76.34±10.74a	18.80±2.36d	31.48±4.86c	16.544**
SAK (mg · kg ⁻¹)	37.02±3.89a	32.18±4.77a	29.22±5.05a	12.13±2.21b	20.590**
RAK (mg · kg ⁻¹)	110.81±10.57b	129.37±4.86a	52.41±5.86c	62.20±2.98c	99.314**
NEK (mg · kg ⁻¹)	1070.23±27.70a	944.84±48.88b	804.33±88.23c	991.22±64.63ab	9.888**
MK (mg · kg ⁻¹)	20371.69±1415.37b	21401.43±361.64b	21401.24±344.35b	23149.42±437.57a	6.525*

注:不同字母表示不同处理间有显著差异($P<0.05$), * $P<0.05$ 、* * $P<0.01$.
Note: Different letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). * $P<0.05$ 、* * $P<0.01$.

表 2 不同坡向切挖边坡土壤理化性质

Tab. 2 Physicochemical properties of soil in different slope directions of cut slopes

	阳坡	半阳坡	半阴坡	阴坡	F 值
pH	8.70±0.03b	8.64±0.15b	7.96±0.04c	8.88±0.05a	71.038**
SWC/%	0.59±0.11ab	0.69±0.03a	0.63±0.09a	0.42±0.09b	5.461*
SOM/(g · kg ⁻¹)	16.12±1.17b	18.48±0.45a	12.77±0.68c	7.08±1.60d	63.765**
TN/(g · kg ⁻¹)	1.04±0.10b	1.21±0.12a	0.76±0.04c	0.53±0.04d	40.793**
AN/(mg · kg ⁻¹)	37.16±7.05b	55.25±8.88a	23.31±3.59c	14.45±5.71c	21.832**

3.3 不同形态钾素与土壤理化性质的相关性

表 3 是不同形态钾素与土壤理化性质的相关性分析结果:WSK、NEK 均与 pH 呈极显著正相关,SAK 与 SWC、TN、AN 均为显著正相关,SAK 与 SOM 呈显著正相关,RAK 和 NSAK 与 SOM、TN、AN 均达到极显著正相关,MK 与 TN 呈显著

负相关,TK 与 SOM 为显著负相关. 这表明在土壤环境中这些因素之间是相互联系、相互制约的,坡向导致了土壤 pH、SWC、SOM、TN 和 AN 含量的差异,进而对土壤钾素动态平衡产生了影响,使土壤中不同钾素形态之间相互转化,因此不同坡向的钾素形态含量发生了变化.

表 3 不同形态钾素与土壤理化性质的相关性

Tab. 3 Correlation between different forms of potassium and soil physicochemical properties

	WSK	NSAK	SAK	RAK	NEK	MK	TK
pH	0.741**	0.449	-0.270	0.416	0.782**	0.235	0.323
SWC/%	0.076	0.430	0.687*	0.489	-0.207	-0.385	-0.394
SOM/(g · kg ⁻¹)	0.342	0.731**	0.845**	0.821**	0.101	-0.708**	-0.684*
TN/(g · kg ⁻¹)	0.525	0.848**	0.707*	0.894**	0.194	-0.606*	-0.569
AN/(mg · kg ⁻¹)	0.562	0.830**	0.659*	0.887**	0.167	-0.509	-0.474

3.4 土壤有效钾的影响因素

将土壤 pH 值(x_1)、SWC(x_2)、SOM 含量(x_3)、TN 含量(x_4)和 AN 含量(x_5)、TK 含量(x_6)、WSK 含量(x_7)、NSAK 含量(x_8)、SAK 含量(x_9)、NEK 含量(x_{10})、MK 含量(x_{11})设为自变量,

土壤 RAK 含量设为因变量(y). 通径分析结果如表 4 所示,各自变量对土壤 RAK 含量的相对重要程度为:土壤 pH > WSK > SOM = TK = MK > NSAK = SAK = MK > SWC = AN. 在土壤理化性质中,土壤 pH 和 SOM 对土壤 RAK 的直接

作用最大;在土壤钾素中,土壤 WSK、TK 和 MK 对土壤 RAK 的直接作用最大. 对比间接途径系数发现,土壤 pH 的间接途径系数大于 SOM 的间接途径系数,说明土壤 pH 对土壤 RAK 的间接作用较大. 土壤 WSK 的间接途径系数大于土壤 TK 和 MK 的间接途径系数,说明土壤 pH 对土壤 RAK 的间接作用较大. 土壤 SAK 的直接途径系数和间接途径系数均较小,对土壤 RAK 的影响程度相应较小,可以忽略不计.

基于以上分析,对土壤钾素、土壤 pH、SWC、SOM、TN 和 AN 与土壤 RAK 之间进行多元线性回归分析. 通过计算将 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 、 x_6 、 x_{10} 、 x_{11} 共

7 个影响因子排除后,可以得到回归方程:

$$y = -1.328 + 0.157x_1 + 0.996x_7 + 0.997x_8 + 0.998x_9 \tag{1}$$

从方程(1)可以看出, x_1 、 x_7 、 x_8 、 x_9 对 y 起主要作用. 结合前面的结果, x_9 对土壤 RAK 所起的作用很小,可以将其进行剔除后得到:

$$y = -1.328 + 0.157x_1 + 0.996x_7 + 0.997x_8 \tag{2}$$

综上可得,土壤 pH 是影响切挖边坡土壤有效钾的主要因素,WSK、NSAK 对切挖边坡土壤有效钾的贡献较大.

表 4 不同形态钾素、土壤理化性质与土壤有效钾之间的途径系数

Tab. 4 Path coefficients among different forms of potassium, soil physicochemical properties and soil available potassium

自变量	与 y 的相关系数	途径系数	间接途径系数(间接作用)											合计
			x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	
x_1	0.416	0.006	/	-0.0001	-0.0003	0.0000	0.0000	0.0006	0.0022	0.0005	-0.0003	-0.0008	0.0005	0.0030
x_2	0.489	0.0003	-0.0023	/	0.0016	0.0004	0.0002	-0.0008	0.0002	0.0004	0.0007	0.0002	-0.0008	0.0024
x_3	0.821	0.002	-0.0008	0.0002	/	0.0005	0.0003	-0.0014	0.0010	0.0007	0.0008	-0.0001	-0.0014	0.0013
x_4	0.894	0.001	0.0000	0.0002	0.0019	/	0.0003	-0.0011	0.0016	0.0008	0.0007	-0.0002	-0.0012	0.0037
x_5	0.887	0.0003	0.0007	0.0002	0.0018	0.0004	/	-0.0009	0.0017	0.0008	0.0007	-0.0002	-0.0010	0.0043
x_6	-0.399	0.002	0.0019	-0.0001	-0.0014	-0.0003	-0.0001	/	0.0004	-0.0003	-0.0008	0.0000	0.0020	-0.0009
x_7	0.785	0.003	0.0044	0.0000	0.0007	0.0003	0.0002	0.0003	/	0.0009	0.0000	-0.0006	0.0001	0.0026
x_8	0.962	0.001	0.0030	0.0001	0.0015	0.0004	0.0003	-0.0006	0.0026	/	0.0004	-0.0005	-0.0007	0.0044
x_9	0.561	0.001	-0.0005	0.0002	0.0017	0.0004	0.0002	-0.0016	-0.0001	0.0004	/	-0.0001	-0.0016	-0.0001
x_{10}	0.548	-0.001	0.0046	-0.0001	0.0003	0.0001	0.0001	0.0000	0.0017	0.0005	0.0001	/	-0.0002	0.0032
x_{11}	0.054	0.002	0.0014	-0.0001	-0.0014	-0.0003	-0.0002	0.0020	0.0002	-0.0004	-0.0008	0.0001	/	-0.0012

4 讨 论

4.1 坡向对切挖边坡土壤理化性质的影响

坡向通过影响光照强度、土壤温度、土壤含水量及养分含量等对土壤肥力、植物群落的构成和分布产生影响^[8-9]. 本研究中,SWC 在阳坡高于阴坡,半阳坡高于半阴坡. 这可能与局部小气候和植被类型差异有关,需要进一步研究. 土壤 pH 在阳坡小于阴坡,这可能与不同坡向的土壤含水量差异有关,土壤水分对土壤 pH 有显著负影响,即含水量高的地区反而土壤 pH 值低^[10]. SOM 含量在阳坡明显高于阴坡,半阳坡明显高于半阴坡. 这可能是由于不同坡向热量的差异造成的,阳坡和半阳坡接受的太阳辐射强度大,导致地表温度更高,影响土壤微生物活性,进而影响土壤有机质的矿化和分解^[11]. 土壤 TN 和 AN 含量在阳坡明显高于阴坡,半阳坡明显高于半阴坡. 这可能与不同坡向土壤有

机质含量的差异有关,土壤有机质与全氮存在显著相关性,当土壤中有效碳源比较丰富时,固氮潜力较高,有利于全氮的积累^[12].

4.2 坡向对切挖边坡土壤钾素形态的影响

坡向可以影响土壤中矿物风化和流失速率进而影响土壤有效钾含量及分布,还会由于太阳辐射的变化而影响土壤钾浓度^[13,14]. 本研究中,土壤 TK 含量表现为阴坡显著高于阳坡. 土壤 RAK 含量表现为阳坡显著高于阴坡,这可能与不同坡向土壤含水量的差异有关. 土壤水分是植物吸收矿质养分的介质,也是养分向植物根部运输的介质,对土壤钾素有效性影响较大. 有研究表明,当土壤含水量增加时,土壤钾的移动性增强,从而使土壤钾素有效性提高^[15]. 土壤 WSK、SAK 和 NSAK 含量均表现为阳坡高于阴坡. 这可能是因为阳坡的光照强度和温度均高于阴坡,植物根系与土壤的交换较强,非交换性钾的释放和转化速度较快,迁移的钾

的扩散速率和含量均增加,从而提高土壤的供钾能力^[16].土壤NEK含量表现为阳坡高于阴坡,半阳坡明显高于半阴坡.这可能是因为阴坡土壤中能够被植物直接吸收利用的RAK含量很低,土壤NEK会缓慢转化为RAK作为植物吸钾的重要来源,从而导致阴坡土壤NEK含量降低^[17].土壤MK含量表现为阴坡显著高于阳坡.这可能是因为阳坡光照较强且温度较高,土壤微生物活性受到影响,促进矿物钾的释放来补充植物生长需要的钾素,从而致使阳坡的土壤MK含量较低^[18].

5 结 论

坡向对切挖边坡不同形态土壤钾素有显著影响.半阳坡和阳坡土壤的RAK、NEK含量更高,土壤的供钾能力较高;半阴坡和阴坡土壤RAK含量较低,导致土壤生态环境主要受到钾素的限制.土壤理化性质对土壤钾素也有影响,土壤pH、TN、AN与NSAK、SAK、RAK均达到显著或极显著正相关.土壤pH是影响切挖边坡土壤有效钾的主要因素,WSK、NSAK对切挖边坡土壤有效钾的贡献较大.

参考文献:

[1] Fu D Q, Yang H, Wang L, *et al.* Vegetation and soil nutrient restoration of cut slopes using outside soil spray seeding in the plateau region of southwestern China [J]. *J Environ Manage*, 2018, 228: 47.

[2] 刘旻霞, 马建祖. 甘南高寒草甸植物功能性状和土壤因子对坡向的响应[J]. *应用生态学报*, 2012, 23: 3295.

[3] 徐长林. 坡向对青藏高原东北缘高寒草甸植被构成和养分特征的影响[J]. *草业学报*, 2016, 25: 26.

[4] 杜加银, 茹美, 倪吾钟. 减氮控磷稳钾施肥对水稻产量及养分积累的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19: 523.

[5] 包耀贤, 吴发启, 刘莉. 渭北旱塬梯田土壤钾素状况及影响因素分析[J]. *水土保持学报*, 2008, 22: 78.

[6] 金继运. 土壤钾素研究进展[J]. *土壤学报*, 1993, 30: 94.

[7] 张亦驰, 李林, 史喜林, 等. 土壤钾素形态及有效性的研究进展[J]. *吉林农业科学*, 2013, 38: 52.

[8] 朱云云, 王孝安, 王贤, 等. 坡向因子对黄土高原草地群落功能多样性的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36: 6823.

[9] Li R R, Zhang W J, Yang S Q, *et al.* Topographic aspect affects the vegetation restoration and artificial soil quality of rock-cut slopes restored by external-soil spray seeding [J]. *Sci Rep-UK*, 2018, 8: 12109.

[10] 高海峰, 白军红, 王庆改, 等. 霍林河下游典型洪泛区湿地土壤pH值和土壤含水量分布特征[J]. *水土保持研究*, 2011, 18: 4.

[11] Bennie J, Huntley B, Wiltshire A, *et al.* Slope, aspect and climate, spatially explicit and implicit models of topographic microclimate in chalk grassland [J]. *Ecol Model*, 2008, 216: 47.

[12] 高洋, 王根绪, 高永恒. 长江源区高寒草地土壤有机质和氮磷含量的分布特征[J]. *草业科学*, 2015, 32: 1548.

[13] Paudel S, Vetaas O. Effects of topography and land use on woody plant species composition and beta diversity in an arid Trans-Himalayan landscape, Nepal [J]. *J Mt Sci-Engl*, 2014, 11: 1112.

[14] Zhu H F, Zhao Y, Nan F, *et al.* Relative influence of soil chemistry and topography on soil available micronutrients by structural equation modeling [J]. *J Plant Nutr Soil Sc*, 2016, 16: 1038.

[15] 占丽平, 李小坤, 鲁剑巍, 等. 土壤钾素运移的影响因素研究进展[J]. *土壤*, 2012, 44: 548.

[16] Zeng Q, Brown P H. Soil potassium mobility and uptake by corn under differential soil moisture regimes [J]. *Plant Soil*, 2000, 221: 121.

[17] 关连珠. 土壤肥科学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 191.

[18] 丛日环, 李小坤, 鲁剑巍. 土壤钾素转化的影响因素及其研究进展[J]. *华中农业大学学报*, 2007, 26: 907.

引用本文格式:

中 文: 王雪, 杨斯茜, 张易帆, 等. 坡向对切挖边坡土壤钾素特征的影响[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2023, 60: 026003.

英 文: Wang X, Yang S Q, Zhang Y F, *et al.* Influence of slope aspect on soil potassium characteristics of cut slopes [J]. *J Sichuan Univ: Nat Sci Ed*, 2023, 60: 026003.