

文章编号:1004-8227(2011)02-0191-06

多年冻土区工程迹地人工恢复区 植物和土壤的矿质元素含量特征

周国英^{1,2}, 李天才¹, 徐文华¹, 孙菁¹, 马海^{1,2}, 陈桂琛^{1*}

(1. 中国科学院高原生物适应与进化重点实验室, 青海 西宁 810001; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:选择青藏高原多年冻土区工程迹地的人工恢复植物和紫花针茅草原的优势植物以及对应的土壤样品进行对照,利用原子吸收法分析了它们的矿质元素含量特征。结果表明:多年冻土区工程迹地人工恢复区植物的元素含量: $>1\ 000\ \mu\text{g/g}$ 的元素有Ca、P和Na, $100\sim 1\ 000\ \mu\text{g/g}$ 的元素有Mn、K、Fe、Mg和Al;而对照紫花针茅草原优势植物的元素含量: $>1\ 000\ \mu\text{g/g}$ 的元素有Ca和Na, $100\sim 1\ 000\ \mu\text{g/g}$ 的元素有P、Mn、K、Fe、Mg和Al。人工恢复区土壤元素含量: $>1\ 000\ \mu\text{g/g}$ 的元素有Ca、Fe和Mn, $100\sim 1\ 000\ \mu\text{g/g}$ 的元素有Mg、K、Al、P和Na;对照紫花针茅草原土壤元素含量: $>1\ 000\ \mu\text{g/g}$ 的元素有Ca、Fe, $100\sim 1\ 000\ \mu\text{g/g}$ 的元素有Mn、Mg、Al、K、P和Na。该区域植物和土壤元素含量都属于Ca $>$ K型。人工恢复植物和对照的紫花针茅草原植物对土壤元素的吸收能力具有较高的相似性。K和Al元素的累积与其他元素没有显著的相关关系,其他元素之间为正相关关系,元素之间的吸收累积属于协同作用,无明显的拮抗作用。

关键词:青藏高原;多年冻土区;人工恢复植被;高寒草原;优势植物;矿质元素

文献标识码:A

青藏铁路、青藏公路是举世瞩目的重大交通基础设施工程,之所以引起全世界的关注,因为它是全世界海拔最高、线路最长和穿越生态敏感脆弱区的铁路和公路。青藏铁路格拉段位于 $29^{\circ}30'\sim 36^{\circ}25'N$, $90^{\circ}30'\sim 94^{\circ}55'E$,全长1 118 km,其中穿越632 km的多年冻土地带,青藏公路也穿越该区域的多年冻土带。青藏铁路和青藏公路建设在多年冻土区形成了许多大小不等的取土场等工程迹地,这些工程迹地的植被自然恢复速度非常缓慢。随着青藏铁路的开通,沿线的生态环境保护工作任务十分艰巨,大量取土场等工程迹地的植被恢复工作,已成为亟待解决的问题。植被自然恢复速度缓慢的原因何在?一直是困扰生态学工作者的一个难题。由于多年冻土区的植被组成相对简单,制约植物生长的环境要素也相对简单,取土场等工程迹地分布区与其周边地区,多年来的降水和有效积温差别不大,可能

在土壤营养元素(主要是矿质元素)上有其特殊性。植物在光合作用过程中,一方面从大气圈中吸收所需要的气体,另一方面也必须从土壤中吸收矿物元素^[1]。而且对于植物来说,微量元素是正常生活和生长所不可缺少的^[2]。微量元素是酶、维生素和生长激素等的重要组成成分,对植物生长发育过程、群落动态演替与生态功能发挥具有关键作用^[3]。土壤是微量元素的主要来源。但是土壤中的微量元素不一定能够满足植物生长的需要,土壤中微量元素供给不足将影响植物的生长发育,微量元素含量过多时,将会发生中毒现象,也将影响植物的正常生长^[2]。为此,本研究对青藏铁路沿线多年冻土区紫花针茅草原和人工恢复工程迹地的土壤和优势植物中的矿质元素含量和分布进行了分析和比较。本文从土壤和植物中的微量元素含量特征以及土壤与植物微量元素的相关性,从地球化学循环的角度分析

收稿日期:2010-03-13;修回日期:2010-05-11

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目:江河源区冻土积雪变化及其生态效应(2007CB411504);国家自然科学基金青藏高原多年冻土区重大工程迹地植被自然恢复的生态学过程与冻土演变的关系研究(40801076);铁道部科技研究开发计划铁路生态保护技术研究——青藏铁路生态保护监测分析研究(2009Z002-C)

作者简介:周国英(1974~),男,青海省乐都人,副研究员,博士研究生,主要从事青藏高原草地植被恢复和药用植物资源研究。

E-mail:zhougy@nwipb.ac.cn

*通讯作者 E-mail:gcchen@nwipb.ac.cn

生境的适宜性,分析植物的生态适应性以及探讨植被恢复速度缓慢的原因,为该地区取土场的人工恢复提供实践经验和理论指导。

1 研究区域自然环境概况

研究区域位于青海省格尔木市唐古拉乡北 10 km 处青藏铁路东侧 210 m,属沱沱河北岸冲洪积平原,地形开阔,略有起伏,局部分布宽浅谷地,周围部分地段有沙地分布。地层主要属第四系全新统粉质粘土、细砂、砾砂、圆砾土。该地段为多年冻土向沱沱河融区过渡地带,主要表现为岛状多年冻土与融区交错分布,融区主要分布于部位较高、排水条件良好、土层较干燥的低缓丘陵。气候属高原大陆性气候类型,具有高寒、干旱、多风等主要特点。根据沱沱河气象站资料,年平均气温为 -4.0°C ,极端最低气温 -45.2°C ,极端最高温 24.7°C ,最热月(7月)平均气温 7.6°C ,最冷月(1月)平均气温 -16.2°C ;平均年降水量 248.5 mm,平均年蒸发量 1 638.9 mm,平均年相对湿度 53%;年平均大风日数 178 d。土壤类型为高山草原土,土壤质地为砂砾质和砂壤质,表层沙砾化。草皮层薄或无,根系较多,腐殖质层厚度 5~10 cm,粒状和团粒状结构较发育,有机质含量 10 g/kg 左右,腐殖质层或过渡层之下即为发育良好、颗粒均匀的粒状结构。全剖面微碱性,pH7.8~8.9,通体石灰反应强烈,钙积层明显。植被类型属高寒草原,即由耐寒旱的多年生丛生禾草和根茎苔草为优势种所形成的植物群落,为青藏高原典型的地带性高寒植被类型^[4~6]。

2 样品采集及分析

2.1 样品采集

取样地点地理范围: N: $34^{\circ}16'3.4'' \sim 34^{\circ}16'6.0''$, E: $92^{\circ}29'0.7'' \sim 92^{\circ}29'50.9''$, ALT: 4 556~4 569 m。选择该地区典型原生紫花针茅草原和工程迹地(青藏铁路取土场,取土深度 1~6 m,面积约 40 000 m^2)。工程迹地自 2001 年进行人工植被恢复。其主要施工工艺为适度平整→地表翻耕→碎化耙沟→种子播种→磨耙镇压。采用东风小型拖拉机机械方法进行地表的适度平整,并对工程迹地进行耕翻处理,从而形成 10~15 cm 的松土层,并对板结的大土块碎化,地表耕翻松土后为植物种子播种创造了条件。在播种种子时,拌加种子基肥(尿

素和磷酸二铵各 $75\text{kg}/\text{km}^2$),种子播种后及时磨耙镇压处理。于 2004 年 8 月,采集样品时,选择工程迹地上人工种植的梭罗草(*Kengyilia thorodiana*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、碱茅(*Puccinellia ditans*)、星星草(*Puccinellia tenuiflora*)、赖草(*Leymus secalinus*)和冷地早熟禾(*Poa crymophila*),选择相邻紫花针茅草原的优势植物胀果棘豆(*Oxytropis stracheyana*)、铺散亚菊(*Ajania khartensis*)、卷鞘鸢尾(*Iris potaninii*)、粗壮嵩草(*Kobresia robusta*)、沙生凤毛菊(*Saussurea arenaria*)、弱小火绒草(*Leontopodium pusillum*)、重齿风毛菊(*S. katochaete*)、二裂委陵菜(*Potentilla bifurca*)、异叶青兰(*Dracocephalum heterophyllum*)、垫状点地梅(*Androsace tapete*)、青藏雪灵芝(*Arenaria roborowskii*)、长爪黄芪(*Astragalus hendersonii*)、垫状棱子芹(*Pleurospermum hedinii*)、青藏苔草(*Carex moorcroftii*)、紫花针茅(*Stipa purpurea*)、紫羊茅(*Festuca rubra*)、梭罗草(*K. thorodiana*),每种植物均随机选取 20 株。同时在紫花针茅草原和工程迹地的植物采集区域分别随机采集土样,土钻法,用 $\phi 30\text{ cm}$ 土钻,取 0~20 cm 土样 10 个,混和均匀,干燥后待处理。

2.2 分析仪器

TAS-986 原子吸收分光光度计(北京普析通用公司生产)。

2.3 样品分析

将采集的植物样品置于干燥通风处自然风干,并分别用去离子水冲洗,去除泥沙、粉尘等污染物,置室内自然阴干,与土壤样品一起于 60°C 下烘干后用玛瑙粉碎机粉碎,装袋,置干燥器中备用。准确称取样品 1.000 g 于瓷坩埚中,放入马弗炉内,从低温升至 500°C ,灰化 3~4 h,冷却后,加入 1:1 HNO_3 4 mL,在低温电热板上加热溶解灰分,移入 50 mL 容量瓶,用去离子水定容,摇匀。用 TAS-986 原子吸收分光光度计测定植物和土壤中的 K、Na、Ca、Mg、P、Al、Fe、Mn 元素的含量。分析均采用标准曲线法,样品回收率为 98.3%~102.5%。

2.4 数据统计分析

实验数据整理后用 Excel 进行平均值的计算,相关分析和独立样本 t 检验来估测各组间的差异显著性用 SPSS17.0 for Windows 统计软件进行分析。

3 结果分析

3.1 植物中矿质元素含量的特征

多年冻土区工程迹地人工恢复植被的主要植物

矿质元素含量的测定结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出多年冻土区工程迹地人工恢复植物的矿质元素间含量平均值的差异很大,最大的是 Ca,达到 1 730. 180 $\mu\text{g/g}$,矿质元素在植物中的含量的顺序为 Ca、P、Na、Mn、K、Fe、Mg 和 Al。 $> 1\ 000\ \mu\text{g/g}$ 的元素有 Ca、P 和 Na,占矿质元素总数的 37. 5%; $100\sim 1\ 000\ \mu\text{g/g}$ 的矿质元素有 Mn、K、Fe、Mg 和 Al,占元素总数的 62. 5%;无 $100\ \mu\text{g/g}$ 以下的矿质元素。

表 1 多年冻土区工程迹地人工恢复植被的主要植物矿质元素含量特征($\mu\text{g/g}$)

Tab. 1 Characteristics of Mineral Elements Contents in Dominant Species of Artificial Restoration Vegetation of Permafrost Region($\mu\text{g/g}$)

元素	Max($\mu\text{g/g}$)	Min($\mu\text{g/g}$)	Mean($\mu\text{g/g}$)	SD
K	828. 6	157. 8	439. 520	323. 289
Na	1 811. 0	549. 3	1 079. 520	396. 475
Ca	2 521. 0	288. 9	1 730. 180	1 248. 821
Mg	387. 9	209. 6	336. 160	119. 925
P	2 075. 0	849. 6	1 407. 120	509. 117
Al	195. 4	124. 3	145. 540	17. 890
Fe	382. 2	291. 1	350. 100	64. 417
Mn	733. 7	423. 0	524. 240	36. 699

该地区原生紫花针茅高寒草原优势植物的矿质元素含量,也是 Ca 最大,达 2 716. 000 $\mu\text{g/g}$ (表 2),其矿质元素在植物中的含量的顺序为 Ca、Na、P、K、Mg、Mn、Fe 和 Al。 $> 1\ 000\ \mu\text{g/g}$ 的元素有 Ca 和 Na, $100\sim 1\ 000\ \mu\text{g/g}$ 的矿质元素有 P、Mn、K、Fe、Mg 和 Al。与安黎哲^[3]报道的陆生植物元素平均含量(Ca:5 000;Na:1 000;K:3 000;Mg:5 000;Mn:100;Fe:200)相比较,无论是人工恢复植被,还是高寒草原,矿质元素中只有 Mn、Fe、Na 含量大于所报道的范围,占元素总数的 37. 5%。人工恢复植被和高寒草原元素含量特点是 Ca $>$ K 型。

表 2 对照紫花针茅高寒草原优势植物中矿质元素含量($\mu\text{g/g}$)

Tab. 2 Characteristics of Mineral Elements Contents in Dominant Species of *Stipa purpurea* Steppes at Permafrost Region($\mu\text{g/g}$)

元素	Max($\mu\text{g/g}$)	Min($\mu\text{g/g}$)	Mean($\mu\text{g/g}$)	SD
K	828. 7	191. 2	691. 924	44. 194
Na	3 371. 0	452. 8	1 960. 329	448. 801
Ca	2 897. 0	2 202. 0	2 716. 000	404. 465
Mg	521. 5	358. 5	424. 329	97. 581
P	1 307. 0	366. 2	742. 076	235. 749
Al	260. 1	0	131. 605	57. 841
Fe	437. 0	290. 5	363. 424	56. 074
Mn	772. 7	153. 0	407. 353	5. 020

对人工恢复区植物元素含量和紫花针茅草原优势植物元素含量差异的显著性比较表明,Mg 和 P 元素的含量达到显著性差异 Mg 的 $p=0. 032$ 和 P 的 $p=0. 047(p<0. 05)$,其余元素含量未达到显著性差异 K 为 $p=0. 08$ 、Na 为 $p=0. 120$ 、Ca 为 $p=0. 059$ 、Al 为 $p=0. 853$ 、Fe 为 $p=0. 840$ 、Mn 为 $p=0. 101$ 。

3. 2 植物中矿质元素含量的变异

由表 3 看出,工程迹地人工恢复区 5 种植物中的矿质元素含量,种间变异较大,介于 0. 070 ~ 0. 736。种间变异最大的是 Ca 元素,含量从 288. 9 ~ 2 521 $\mu\text{g/g}$,相差 8. 726 倍,变异系数 0. 722。变异系数的大小变化顺序为 K、Ca、Na、P、Mg、Fe、Al 和 Mn;最大值与最小值的比值,即相差倍数的顺序为 Ca、K、Na、P、Mg、Mn、Al 和 Fe,倍数相差 > 2 的有 Ca:8. 726、K:5. 251、Na:3. 297 和 P:2. 442,其余相差倍数均介于 1 ~ 2,分别是 Mg:1. 851、Mn:1. 735、Al:1. 572、Fe:1. 313。对应原生高寒草原 17 种植物中矿质元素含量,种间差异较小,介于 0. 012 ~ 0. 440。种间差异最大的是 Al,其最小值小到无法检测,因此其最大值与最小值的比值也达到无穷,变异系数为 0. 440。其变异系数的大小变化顺序为 Al、P、Mg、Na、Fe、Ca、K 和 Mn;最大值与最小值的比值,即相差倍数的顺序为 Al、Na、Mn、K、P、Fe、Mg 和 Ca。

表 3 多年冻土区工程迹地人工恢复植被和紫花针茅草原植物中矿质元素含量变异特征

Tab. 3 Characteristics of Mineral Elements Contents Variation in Dominant Species of Artificial Restoration Vegetation and *Stipa purpurea* Steppes of Permafrost Region

元素 Element	人工恢复植被 Artificial Restoration Vegetation		紫花针茅草原 <i>Stipa Purpurea</i> Steppes	
	CV	Max; Min	CV	Max; Min
K	0. 736	5. 251	0. 064	4. 334
Na	0. 367	3. 297	0. 229	7. 445
Ca	0. 722	8. 726	0. 149	1. 316
Mg	0. 357	1. 851	0. 230	1. 455
P	0. 362	2. 442	0. 318	3. 569
Al	0. 123	1. 572	0. 440	—
Fe	0. 184	1. 313	0. 154	1. 504
Mn	0. 070	1. 735	0. 012	5. 050

注:“—”表示最小值为 0,无法计算。

3. 3 植物中元素间的相关关系分析

多年冻土区工程迹地人工恢复植被的主要植物各元素之间的相关关系见表 4,结果表明元素之间 K、Al 和 Mn 的累积与其他元素没有显著的相关关系,而 Ca 与 Mg 呈极显著正相关关系,Na 与 P、Ca 与 Fe、Mg 与 Fe 均为显著正相关关系,这些元素的

吸收累积较好的协同作用。

表 4 多年冻土区工程迹地人工恢复植被的主要植物矿质元素之间的相关性

Tab. 4 Correlation for the Mineral Elements Contents in Dominant Species of Artificial Restoration Vegetation at Permafrost Region

	K	Na	Ca	Mg	P	Al	Fe	Mn
K	1							
Na	-0.789	1						
Ca	-0.070	0.350	1					
Mg	-0.208	0.420	0.988**	1				
P	0.576	-0.899*	-0.704	-0.739	1			
Al	-0.147	0.156	0.308	0.349	-0.135	1		
Fe	-0.022	0.082	0.903*	0.914*	-0.418	0.500	1	
Mn	0.720	-0.500	0.582	0.478	0.075	-0.060	0.605	1

注: *表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关; **表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关

多年冻土区高寒草原的主要植物矿质元素各元素之间的相关关系见表 5, 结果表明原生紫花针茅草原植被只有 K 和 Al 元素的累积与其他元素没有显著的相关关系, 而 Ca 与 Na、Fe 和 Mn 呈极显著正相关关系, Na 与 Mg、Ca 与 Mg、P 和 Mg, Ca 和 Fe 均为显著正相关关系, 这些元素的吸收累积具有较好的协同作用。

表 5 多年冻土区高寒草原的主要植物矿质元素之间的相关性

Tab. 5 Correlation for the Mineral Elements Contents in Dominant Species of *Stipa purpurea* Steppes at Permafrost Region

	K	Na	Ca	Mg	P	Al	Fe	Mn
K	1							
Na	0.092	1						
Ca	-0.268	0.643**	1					
Mg	-0.072	0.539*	0.596*	1				
P	0.259	0.367	-0.013	0.487*	1			
Al	0.044	-0.072	-0.311	-0.072	0.173	1		
Fe	0.055	0.430	0.505*	0.262	0.167	-0.285	1	
Mn	-0.275	0.462	0.347	0.144	0.177	-0.060	0.774**	1

注: **表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; *表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

该地区无论是人工恢复植物, 还是高寒草原植物 Na、Ca、Mg 和 Fe 和其他元素具有显著正相关或极显著正相关关系, 而很少有负相关关系, 因此这 4 种元素对于其他元素的吸收都起到促进作用。

3.4 土壤元素的贮存量 and 植物的富集系数

植物和土壤是生态系统内具有紧密联系的两个分室, 尤其是植物体内的各元素含量与土壤中的元素含量存在着一定程度的相关性^[7]。多年冻土区工程迹地人工恢复植被和对照高寒草原土壤中的元素

含量如表 6 所示。

表 6 多年冻土区工程迹地人工恢复植被和对照高寒草原土壤元素含量和植物的富集系数

Tab. 6 Characteristics of Mineral Elements Contents in Soil and the Enrichment Index of Plants of Artificial Restoration Vegetation and *Stipa purpurea* Steppes at Permafrost Region at Permafrost Region

元素 Element	人工恢复植被 Artificial restoration vegetation			紫花针茅草原 <i>Stipa purpurea</i> steppes		
	植物 Plant	土壤 Soil	吸收率 Ax	植物 Plant	土壤 Soil	吸收率 Ax
K	439.52	567.00	0.78	691.92	436.30	1.59
Na	1 079.52	142.90	7.55	1 960.33	148.20	13.23
Ca	1 730.18	6 705.00	0.26	2 716.00	6 413.00	0.42
Mg	336.16	822.00	0.41	424.33	852.30	0.50
P	1 407.12	286.30	4.91	742.08	254.90	2.91
Al	145.54	494.30	0.29	131.60	616.80	0.21
Fe	350.10	1 198.00	0.29	363.42	1 168.00	0.31
Mn	524.24	1 445.00	0.36	407.35	933.70	0.44

在植物生长发育过程中, 土壤通过植物根系向植物提供生长所必需的物质, 营养元素对于植物的生长起着极重要的作用。对人工恢复区和高寒草原的土壤中元素进行比较, 发现除 Mn 外, 其余元素含量较为相似, 从矿质元素的含量来看该地区不存在限制性因素。人工恢复植被和高寒草原土壤中各元素之间含量差异较大, 其中含量最大的是 Ca, 分别达到 6 705.00 和 6 413.00 $\mu\text{g/g}$, 人工植被土壤元素含量的顺序为 Ca、Mn、Fe、Mg、K、Al、P 和 Na, 高寒草原土壤元素含量的顺序为 Ca、Fe、Mn、Mg、Al、K、P 和 Na。土壤元素含量特点也是 $\text{Ca} > \text{K}$ 型。

Ax 是元素的富集系数, 是每种元素的平均含量与土壤中该元素含量的比值, 因此富集系数的大小与元素在植物和土壤中的含量有关, 富集系数的大小取决于植物对营养元素的需要程度, 也在一定程度上反映植物对元素的吸收能力。通过比较可以看出该区域人工恢复植被和高寒草原的植物对于元素的吸收能力大小顺序分别是: Na、P、K、Mg、Mn、Al、Ca 和 Fe, Na、P、K、Mg、Mn、Ca、Fe 和 Al, 植物对土壤元素的吸收能力极具相似性。

4 讨论

青藏铁路和青藏公路建设在青藏高原多年冻土区形成了许多取土场等工程迹地, 它们往往存在表土缺失、压实, 导致地表物理结构过于紧密, 造成水分过高或过低等, 表土缺失会导致营养成分的缺失或者微量元素缺失或过多, 此外, 还会产生酸碱度过

强、盐度过高等毒性方面的问题^[11]。

紫花针茅草原形成工程迹地后,其地表状况和土壤条件明显恶化,地表粗粒含量明显增加,紫花针茅草原和工程迹地土壤基础养分如表 7 所示。工程迹地土壤中的有机质含量只有紫花针茅草原的

37.48%,全氮仅为 50%,碱解氮仅为 37.04%,速效磷仅为 33.33%,而全盐含量是紫花针茅草原的 143.90%,pH 值也有所增加。

除土壤养分因素外,土壤中化学元素的含量水

表 7 多年冻土区紫花针茅草原和人工恢复区土壤养分特征

Tab. 7 Soil Nutrient Contents of Artificial Restoration Vegetation and *Stipa purpurea* Steppes at Permafrost Region at Permafrost Region

	有机质 (g/kg)	全 N (g/kg)	全 P ₂ O ₅ (g/kg)	全 K ₂ O (g/kg)	碱解 N (mg/kg)	速效 P (mg/kg)	速效 K (mg/kg)	全盐 (g/kg)	pH
人工恢复植被 Artificial Restoration Vegetation	2.05	0.18	0.69	14.01	10	2	71	0.59	8.66
紫花针茅草原 <i>Stipa Purpurea</i> Steppes	5.47	0.36	0.54	11.50	27	6	68	0.41	8.40

平与植物中化学元素的水平有密切的关系,化学元素的不足和过量都将引起植物体产生各种各样的生理病害^[8],进而影响植被的发育。植物从土壤中吸取各种元素,其营养元素和微量元素的不足或过多都会影响植物的正常生长发育^[9]。与所报道的陆生植物平均元素含量 K 3 000 $\mu\text{g/g}$ 、Na 1 000 $\mu\text{g/g}$ 、Ca 5 000 $\mu\text{g/g}$ 、Mg 5 000 $\mu\text{g/g}$ 、Fe 200 $\mu\text{g/g}$ 、Mn 100 $\mu\text{g/g}$ 相比较^[1,10,11],该地区工程迹地和紫花针茅草原的 Fe、Mn、Na 含量均高出陆生高等植物元素的平均含量。其中工程迹地和紫花针茅草原土壤中 Mn 含量是陆生植物平均含量的 14.45 和 9.33 倍,但已有的研究表明 Mn 是许多酶的活化剂,Mn 能对植物体内许多代谢过程产生影响。缺 Mn 时,叶绿体膜结构遭到破坏,致使叶绿体解体,叶绿素含量降低,叶片出现失绿变黄现象。Mn 还以结合态直接参加光合作用的放氧过程。Mn 是光合作用的光反应中水的分解所不可缺少的元素。而未见 Mn 过多造成植物伤害的报道。成土母质是土壤中微量元素的主要来源,是决定土壤微量元素含量与分布格局的最主要因素^[13],该地区工程迹地和紫花针茅草原土壤中的矿质元素含量也极为接近也证明了这一点。在这种元素含量水平下,紫花针茅草原植物生长发育正常,因此从本研究的结果可以推断,土壤 Na、P、K、Mg、Mn、Al、Ca 和 Fe 元素的含量不是该地区工程迹地恢复的制约因子。

5 结论

(1)多年冻土区工程迹地人工恢复植物的矿质元素间含量平均值的差异很大,>1 000 $\mu\text{g/g}$ 的元素有 Ca、P 和 Na,介于 100~1 000 $\mu\text{g/g}$ 的矿质元

素有 Mn、K、Fe、Mg 和 Al。含量最大的 Ca 达 1 730.180 $\mu\text{g/g}$,矿质元素含量的顺序为 Ca、P、Na、Mn、K、Fe、Mg 和 Al。人工植被土壤元素含量的顺序为 Ca、Mn、Fe、Mg、K、Al、P 和 Na,土壤元素含量特点也是 Ca>K 型。

(2)多年冻土区工程迹地人工恢复区 5 种植物的矿质元素含量,种间变异较大,介于 0.070~0.736。变异系数的大小变化顺序为 K、Ca、Na、P、Mg、Fe、Al 和 Mn。倍数相差>2 的有 Ca:8 726、K:5 251、Na:3 297 和 P:2 442,其余相差倍数均介于 1~2,分别是 Mg:1 851、Mn:1 735、Al:1 572、Fe:1 313。

(3)多年冻土区工程迹地人工恢复区元素之间 K、Al 和 Mn 的累积与其他元素没有显著的相关关系,而 Ca 与 Mg 呈极显著正相关关系,Na 与 P、Ca 与 Fe、Mg 与 Fe 均为显著正相关关系,这些元素的吸收累积具有较好的协同作用。

(4)多年冻土区人工恢复植被的植物对于元素的吸收能力大小顺序是:Na、P、K、Mg、Mn、Al、Ca 和 Fe,而对照高寒草原植物对元素的吸收能力大小顺序为 Na、P、K、Mg、Mn、Ca、Fe 和 Al,植物对土壤元素的吸收能力极具相似性。

参考文献:

- [1] 候学煜. 中国植被地理及优势植物化学成分[M]. 北京:科学出版社,1982:358.
- [2] 中国科学院南京土壤研究所微量元素组编著. 土壤和植物中微量元素分析方法[M]. 北京:科学出版社,1979:1~12.
- [3] JULIE E K, NANCY C J, COVINGTON W W. Slash pile burning effects on soil biotic and chemical properties and plant establishment: Recommendation for amelioration[J]. Restora-

- tion Ecology, 2004, 12(1): 52~62
- [4] 吴征镒. 中国植被[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [5] 周兴民, 杜庆. 青海植被[M]. 西宁: 青海人民出版社, 1987.
- [6] 周立华. 青海省植被图(1:1000000)[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1990.
- [7] 黄建辉, 陈灵芝. 北京百花山附近杂灌丛的化学元素含量特征[J]. 植物生态学与地植物学报, 1991, 15(3): 224~233.
- [8] 李庆逵主编. 中国科学院微量元素研究工作会议汇刊[M]. 北京: 科学出版社, 1962: 254.
- [9] 范黎明, 程志新, 张桂荣, 等. 小兴安岭改造后森林沼泽植物主要微量元素的研究[J]. 光谱实验室, 1997, 14(2): 47~50.
- [10] 多布罗沃斯基. 微量元素地理学[M]. 朱颜明译. 北京: 科学出版社, 1987.
- [11] 安黎哲, 刘艳红, 冯虎元, 等. 乌鲁木齐河源区高寒冰缘植物化学元素的含量特征[J]. 西北植物学报, 2000, 20(6): 1 053~1 059.
- [12] 刘足根, 彭昆国, 方红亚, 等. 江西大余县荡坪矿尾矿区自然植物组成及其重金属富集特征[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(2): 221~225.
- [13] SMITH R S, SHIEL R S, BARDGETT R D, et al. Soil microbial community, fertility, vegetation and diversity as targets in the restoration management of a meadow grassland[J]. Journal of Applied Ecology, 2003, 40(1): 51~64.

CHARACTERISTICS ANALYSIS OF MINERAL ELEMENTS CONTENTS IN DOMINANT SPECIES AND SOIL OF ARTIFICIAL RESTORATION VEGETATION OF QINGHAI—TIBET PLATEAU PERMAFROST REGION

ZHOU Guo-ying^{1,2}, LI Tian-cai¹, XU Wen-hua¹, SUN Jing¹, MA Hai^{1,2}, CHEN Gui-chen¹

(1. the Key Laboratory of Adaptation and Evolution of Plateau Biota, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: We analyzed mineral elements of artificial restoration vegetation of Qinghai-Tibet Plateau permafrost region, plants and soil of superior alpine grassland by atomic absorption spectrometry. Results showed that in artificial restoration areas of permafrost region, contents of Ca, P and Na in plants were above 1 000 $\mu\text{g/g}$; Mn, K, Fe, Mg and Al were from 100 to 1 000 $\mu\text{g/g}$. In native prairie plant, contents of Ca and Na in plants were above 1 000 $\mu\text{g/g}$; P, Mn, K, Fe, Mg and Al were from 100 to 1 000 $\mu\text{g/g}$. In artificial restoration region, contents of Ca, Fe and Mn in soil were above 1 000 $\mu\text{g/g}$; Mg, K, Al, P, and Na were from 100 to 1 000 $\mu\text{g/g}$. In alpine grassland, contents of Ca and Fe in soil were above 1 000 $\mu\text{g/g}$; Mn, Mg, Al, K, P and Na were from 100 to 1 000 $\mu\text{g/g}$. Content of Ca was higher than that of K in both plant and soil. The absorption capacity of soil in artificial restoration of vegetation followed the order of Na, P, K, Mg, Mn, Al, Ca, Fe; and that in alpine grassland followed the order of Na, P, K, Mg, Mn, Ca, Fe, Al. The absorptive capacity of soil was rather similar to plants. Accumulation of K and Al had no significant correlation with other elements, while the other elements had positive correlation with each other, which means that there is synergy rather than antagonistic effect among the elements.

Key words: the Qinghai-Tibet Plateau; permafrost region; artificial restoration vegetation; alpine grassland; dominant species; mineral elements