

光伏电站干扰下高寒荒漠草原区植被和土壤变化特征

李少华¹, 高琪², 王学全¹, 兰岚¹, 杨占武³

(1. 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091;
2. 内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 呼和浩特 010019; 3. 青海省林业科学研究所, 西宁 810011)

摘要: 为了研究光伏电站对高寒荒漠草原区植被与土壤的影响, 以共和盆地塔拉滩倍翔光伏产业园区为研究对象, 采用样地调查法选取围封区(WF)、围封+光伏区(WG)和自然生长区(DZ)内 3 块 10 m×10 m 典型样地, 调查了各类型区植被群落结构和土壤理化性状特征, 并结合各指标间的差异评价了光伏电站对其植被和土壤的作用效果。结果表明: 围封和光伏电站对植被与土壤具有显著影响, 与 2013 年相比, 2015 年围封+光伏区(WG)植被群落的植物种数、盖度、地上生物量、丰富度指数、土壤含水量、有机质和全氮依次升高了 116.7%, 83.9%, 68.7%, 119.2%, 88.6%, 83.0% 和 81.8%, 呈现显著变化($P<0.05$)。光伏发电板可改善高寒荒漠草原植物生长所需的环境因子, 增加土壤水分, 起到保育脆弱生态系统和防风固沙的作用, 促使荒漠草原朝着正向演替发展。

关键词: 共和盆地; 光伏电站; 植被特征; 群落多样性; 土壤特征

中图分类号: S812.2; TM615 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2016)06-0325-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2016.06.054

Characteristics of Vegetation and Soil Property Changes by Photovoltaic Plant Interference in Alpine Desert Steppe

LI Shaohua¹, GAO Qi², WANG Xuequan¹, LAN Lan¹, YANG Zhanwu³

(1. Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091; 2. College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019; 3. Qinghai Forestry Research Institute, Xining 810011)

Abstract: In order to find out the impact of the construction of photovoltaic power plants on vegetation and soil in alpine desert steppe, this study selected the Beixiang photovoltaic industry park of Tara Beach in Gonghe Basin as the research object, and conducted consecutive monitoring plots in August of 2013—2015. By choosing 3 typical plots of 10 m×10 m within fenced area, PV+fenced area and natural growth zone, and through using quadrats, this study surveyed vegetation structure characteristics and analyzed soil properties in laboratory. Finally, different indicators that evaluated the effects of photovoltaic plant were combined. The results showed that: Fenced and photovoltaic plants had a significant impacts on the vegetation and soils. Compared with the data which surveyed in 2013, the photovoltaic fenced area data of plant species numbers, vegetation coverage, aboveground biomass, richness index, soils water content, organic matter content and nitrogen content respectively increased by 116.7%, 83.9%, 68.7%, 119.2%, 88.6%, 83.0% and 81.8% in 2015, which showed significant change ($P<0.05$). Voltaic panels improved environmental factors of plant growth in alpine desert steppe, especially increased soil water content, which could protect fragile ecosystems and showed sand-fixing effect, promoting the succession development of desert grassland.

Keywords: Gonghe Basin; photovoltaic plant; vegetation characteristics; community diversity; soil characteristics

共和盆地位于三江源自然保护区的东北部, 处于昆仑山与祁连山的过渡地带, 总面积约 1.8×10^4 km², 黄河在其腹部呈半圆形流程约 400 km, 其流域面积占黄河发源区总面积的 10.5%^[1]。20 世纪中期塔拉滩还是共和盆地最适宜放牧的地区, 但由于气候变化、超载过牧和开垦农田, 使得原生植被群落遭到严重破坏, 土地更加贫瘠, 最终导致塔拉滩成为盆地内分布流沙面积最大的区域^[2]。加之海拔高, 气候恶劣, 生态脆弱及人口和牲畜数量迅速增加, 致使盆地内生态、环境和资源问题日益严峻^[3]。由于对高寒荒

收稿日期: 2016-05-25
资助项目: 国家“十二五”科技支撑项目(2012BAD16B0105); 林业公益性行业科研专项(201404304-03)
第一作者: 李少华(1992—), 男, 河南濮阳人, 硕士研究生, 主要从事荒漠化防治研究。E-mail: 2227401357@qq.com
通信作者: 王学全(1965—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 博士, 研究员, 主要从事高寒区生态水文研究。E-mail: wxq@caf.ac.cn

漠草原生态系统的结构功能认识不足,缺乏对草原资源进行科学管理与合理利用,长期以来采取掠夺式经营,草畜矛盾日益突出,制约了该区域草地畜牧业的可持续发展^[4]。近 20 年来,当地通过围封禁牧、固定流沙等措施以减轻人类活动对草场退化的影响,保育原生植被成为修复退化生态系统的重要环节^[5]。

塔拉滩地处共和盆地的中东部,由于海拔高、大气稀薄、透明度好,属于我国太阳能资源丰富区。2009 年以来,依托区域资源优势和政策支持,开始大力发展光伏产业,至 2015 年 8 月这里已成为我国太阳能光伏装机容量最大的地区,极大地促进了当地社会经济发展^[6],但是光伏电站对周围荒漠草原生态系统的影响机制还不清楚。目前关于高寒荒漠草原区的研究仅有少量报道,魏占雄等^[7]通过 TM 遥感影像解译和野外实地调查,分析了高寒草地荒漠化的形成原因和机理,并提出了相应的防治措施;魏婷婷等^[8]在进行共和盆地植被样线调查的基础上,将荒漠化草地划分为 5 个等级,分析了不同沙化程度区的植被群落结构组成、盖度、生物量以及土壤物理指标间的差异性;王学全等^[9]研究了塔拉滩 3 种建群植被群落多样性及土壤理化性状指标的分布特征,并且探讨了高寒干旱环境下不同植被物种分布格局形成的主要影响因子。鉴于此,为了摸清修建光伏电站对高寒荒漠草原区植被与土壤的影响,通过以塔拉滩倍翔光伏产业园区为研究对象,于 2013—2015 年 8 月份连续 3 年对围封区(WF)、围封+光伏区(WG)和自然生长区(DZ)的植物群落特征、植物多样性及土壤理化性质进行野外调查和室内试验分析,揭示高寒荒漠草原区土壤—植被系统对修建光伏电站的响应机制,以期能为该区生态环境保护措施的制定提供数据支持。

1 研究区概况

青海共和盆地位于青藏高原东北部,属于高寒干旱大陆性气候,1980—2015 年多年平均降雨量 311 mm,年均蒸发量 1 800 mm,年均日照时数 2 907.8 h,年均气温 1.5 ℃^[10]。倍翔光伏产业园距共和县城南约 8 km,地理位置范围(36°57′21″—36°59′38″N, 98°24′9″—98°26′12″E),海拔 2 920~2 926 m,地势比较平坦。盆地内的地表径流主要有内陆河—沙珠玉河和外流河—黄河两大水系;土壤类型主要有栗钙土、棕钙土、风沙土和草甸土;植被类型主要有西北针茅(*Stipa sareptana* var. *krylovii* (Roshev.) P. C. Kuo et Y. H. Sun)、披碱草(*Elymus dahuricus* Turcz.)、青海固沙草(*Orinus kokonorica* (K. S. Hao) Keng)、芨芨草(*Achnatherum splendens* (Trin.) Nevski)、沙蒿(*Artemisia salsoloides* Willd.)、毛刺锦鸡儿(*Caragana tibetica* Kom.)和赖草(*Leymus secalinus* (Georgi) Tzvel.)^[11]。

2 研究方法

2.1 试验设计与分析

野外试验在青海省海南州共和县次汗素工业园区内的倍翔光伏产业园进行,该光伏电站建于 2012 年 9 月,太阳能板离地高度为 0.5 m,大小为 1 m×2 m,于 2013—2015 年的 8 月中旬进行植被与土壤调查。在围封区(WF)、围封+光伏区(WG)和自然生长区(DZ)均布设 3 块 10 m×10 m 的样地,使用水泥桩记录位置和 GPS 定位。样地内打好 1 m×1 m 网格,随机选取 5 个样方。

植被调查内容包括:植物种类、株数、高度和盖度,生物量的测定方法采用 0.25 m×0.25 m 齐地剪割,并且挖取地下根系,用于测定地下生物量,野外称量鲜重。同时在各样方内分别沿“S”型采集 0—20 cm 层土样 1 kg;为准确测定土壤含水量,使用铝盒采样,在野外称重。

植物生物量和土壤含水量在青海省治沙试验站实验室完成,土壤质地、有机质和全氮含量在国家林业局森林生态环境重点实验室完成。生物量的测定方法为 105 ℃下杀青 5 min 后在 65 ℃下烘 48 h 称重,土壤含水量采用铝盒烘干法测定,土壤机械组成采用比重计法测定,粒径划分参照国际制标准,即砂粒(2.0~0.02 mm)、粉砂粒(0.02~0.002 mm)和黏粒(0~0.002 mm)。土壤 pH 值采用酸度计法测定;有机质含量采用重铬酸钾—外加热法测定;全 N 含量采用凯氏定氮法测定^[12]。

2.2 数据处理

选用物种丰富度指数(R)和 Shannon-Wiener 指数(H)进行群落多样性评价,计算公式^[13]为:

(1)丰富度指数(R): $R=S$

(2)Shannon—Wiener 指数(H): $H=-\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$

(3)Pielou 指数(J): $J=(-\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i)/\ln S$

式中:S 代表物种数目; $P_i=N_i/N$, N_i 为第 i 种植物的个体数目, N 为所有植物种的个体总数。

采用 Microsoft Excel 2007 进行数据处理和图表绘制,采用 SPSS 19.0 统计软件中的 One-Way ANOVA 程序进行方差分析,使用最小显著差数法进行多重因子间比较。

3 结果与分析

3.1 不同样地类型区植被组成特征

经过样方调查,2015 年各样地中植物种类的分布多为荒漠区旱生物种,WG 中植物种数最多,各样地间物种数量差别明显(表 1)。WF 中植物共计 3 科 9 属 9 种,其中禾本科 5 属 5 种,菊科 3 属 3 种,蒺藜科 1 属 1 种;WG 中植物共计 4 科 13 属 13 种,其中禾本科 7 属 7 种,菊科 3 属 3 种,豆科 2 属 2 种,车前科 1 属 1

种;DZ 中植物共计 3 科 5 属 6 种,禾本科 3 属 4 种,瑞香科 1 属 1 种,菊科 1 属 1 种。各样地中禾本科植物种数均最多,依次占相应总数的 55.6%,53.8%和 66.7%。2015 年样方调查中共有植物 16 种,按植物的生长型主要分为 3 类:半灌木、多年生草本和一年生草本植物,其中半灌木有 3 种,占总数的 18.7%;多年生

草本植物有 8 种,占总数的 62.6%;一年生草本植物有 3 种,占总数的 18.7%。一年生草本植物在 DZ 中占 50%,多年生草本在 WG 中占 76.9%,较 WF 中的比例高,这种差异反映了光伏电厂促进了植物生境条件的改善,植物对环境因子的改变产生适应性变化,最终导致各样地内物种组成发生变化。

表 1 样地基本情况

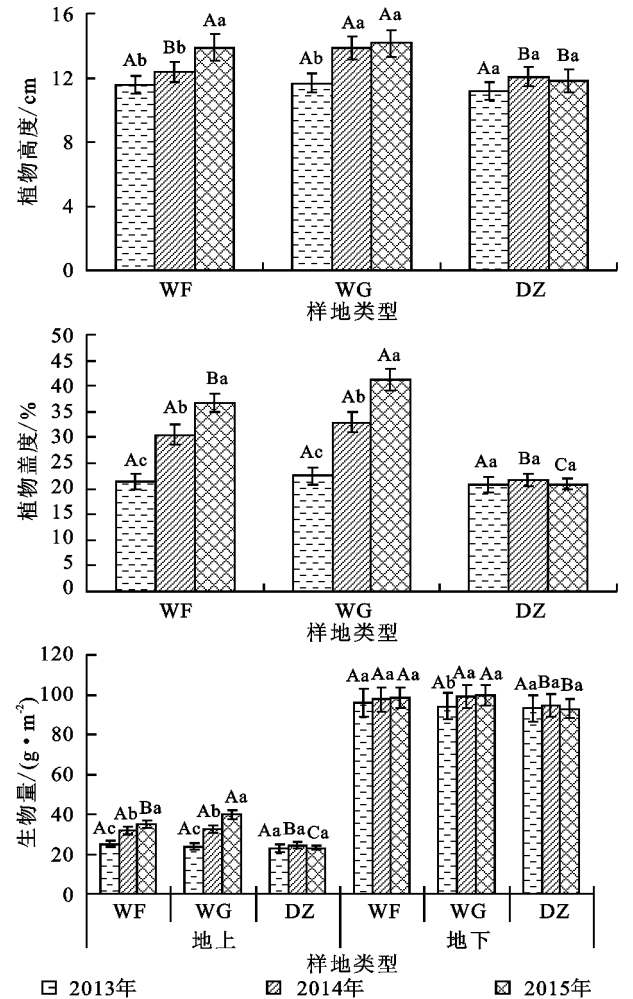
样地编号	样地类型	地理位置(海拔高度/m)	样方调查的主要植物种类
WF	围封样地(电厂内无光伏发电板)	36°59′24″N 98°25′45″E (2 922)	芨芨草(<i>Achnatherum splendens</i>)、早熟禾(<i>Poa annua</i> L.)、青海固沙草(<i>Orinus kokonorica</i>)、西北针茅(<i>Stipa sareptana</i> var. <i>krylovii</i>)、星星草(<i>Puccinellia tenuifolia</i> (Boiss. & Reut.) Andr.)、蒲公英(<i>Taraxacum mongolicum</i> Hand.-Mazz.)、狗娃花(<i>Aster hispidus</i> Thunb.)、沙蒿(<i>Artemisia salsoloides</i>)、骆驼蓬(<i>Peganum harmala</i> Linn.)
	围封+光伏样地(电厂内有光伏发电板)	36°58′12″N 98°24′50″E (2 926)	芨芨草(<i>Achnatherum splendens</i>)、毛刺锦鸡儿(<i>Caragana tibetica</i>)、西北针茅(<i>Stipa sareptana</i> var. <i>krylovii</i>)、青海固沙草(<i>Orinus kokonorica</i>)、短叶羊茅(<i>Festuca brevipolia</i> Schult. et Schult. f.)、蒲公英(<i>Taraxacum mongolicum</i>)、星星草(<i>Puccinellia tenuifolia</i>)、赖草(<i>Leymus secalinus</i>)、早熟禾(<i>Poa annua</i> L.)、车前(<i>Plantago asiatica</i> Ledeb.)、苜蓿(<i>Medicago polymorpha</i> Linn.)、狗娃花(<i>Aster hispidus</i>)、沙蒿(<i>Artemisia salsoloides</i>)
DZ	自然生长样地(电厂围栏外)	36°56′34″N 98°25′27″E (2 925)	狗娃花(<i>Aster hispidus</i>)、狼毒(<i>Stellera chamaejasme</i> L.)、芨芨草(<i>Achnatherum splendens</i>)、早熟禾(<i>Poa annua</i> L.)、青海固沙草(<i>Orinus kokonorica</i>)、醉马草(<i>Achnatherum inebrians</i> (Hance) Keng)

3.2 不同样地植物群落的生长特征

从图 1 可以看出,随着围封和修建光伏电厂的时间增加,各样地间植物的高度、盖度和生物量存在差异,并且呈现增长趋势。3 年各样地间植物平均高度差别不显著,WF、WG 和 DZ 样地中的平均值依次为 12.53,13.21,11.64 cm,但 WF 样地 2014—2015 年和 WG 样地 2013—2014 年高度有显著差异;植被群落的盖度、地上生物量存在显著差异($P<0.05$)。不同样地植被群落盖度和地上生物量的大小顺序均为 $WG>WF>DZ$,电厂围栏内植物群落的地上生物量显著高于围栏外植物群落($P<0.05$);地下生物量(根系)增加缓慢,WF、WG 和 DZ 样地中植被地下生物量的平均值依次为 97.21,97.54,93.63 g/m²;随着围封时间增加,植物群落的地下/地上生物量的比值呈现减少的趋势,并且各样地大小顺序为 $DZ>WF>WG$,平均比值依次为 4.01,3.21 和 3.05。

3.3 不同样地植物群落的物种多样性特征

从表 2 可以看出,不同样地植物群落的物种丰富度指数、多样性指数和均匀度指数各不相同,随着围封和建立光伏电厂的时间增加,丰富度指数呈现显著增加趋势($P<0.05$)。植物群落的丰富度指数和多样性指数均在 WG 样地最高,3 年平均值分别达到 9.1 和 2.22;DZ 样地最低,3 年平均值仅为 5.0 和 1.90,具有显著性差异。均匀度指数在 WF 样地最高,DZ 样地最低,3 处样地近 3 年平均值依次为 0.631,0.540 和 0.521,差别不明显。



注:图中不同大写字母表示不同样地同一年份之间差异显著;不同小写字母表示同一样地不同年份之间差异显著($P<0.05$)。下同。

图 1 各样地植物群落的生长指标特征

表 2 各样地生物多样性指数特征

指标	围封样地(WF)			围封+光伏样地(WG)			自然生长样地(DZ)		
	2013 年	2014 年	2015 年	2013 年	2014 年	2015 年	2013 年	2014 年	2015 年
丰富度指数	5.3±1.1Ab	6.7±1.4Bb	9.8±1.3Ba	5.8±0.9Ac	8.6±1.5Ab	12.7±2.4Aa	4.7±0.5Aa	5.3±1.0Ca	5.1±0.8Ca
多样性指数	1.85±0.21Aa	2.09±0.35Aa	2.16±0.27Ba	1.89±0.17Ab	2.30±0.21Aa	2.47±0.16Aa	1.92±0.07Aa	1.88±0.11Ba	1.90±0.05Ca
均匀度指数	0.531±0.07Ac	0.658±0.05Ab	0.704±0.06Aa	0.526±0.05Ab	0.534±0.07Bb	0.561±0.08Ba	0.524±0.03Aa	0.517±0.04Ba	0.520±0.02Ca

注：表中数值表达形式为“平均值±标准差”，不同大写字母表示不同样地同一年份之间差异显著；不同小写字母表示同一样地不同年份之间差异显著($P<0.05$)。下同。

3.4 不同样地土壤物理性状变化特征

从表 3 可以看出,随着围封和建立光伏电站时间的增加,各样地 0—20 cm 土层土壤的机械组成发生显著变化,pH 呈降低趋势,黏粒和粉砂粒含量呈增加趋势,砂粒含量显著减少,土壤质地类型朝着砂质壤土转变,促进了沙改壤的形成过程。土样中各径级所占比例均为砂粒>粉砂粒>黏粒,样地间差异显著,但是土壤类型没有改变,说明在高寒荒漠草原区

土壤改良需要较长时间。

土壤 pH 的变化范围为 8.52~8.97,显碱性,样地间差异不显著。样地间土壤含水量差异明显,其中光伏电站区土壤含水量显著提高($P<0.05$),土壤含水量的大小顺序为:WG>WF>DZ,平均值依次为 8.16%,7.37%和 6.05%,说明光伏电板可以汇集雨水,提高土壤含水量,降低土壤蒸散发,最大限度地减少土壤水分的散失。

表 3 各样地表层土壤机械组成、pH 和土壤含水量

指标	围封样地(WF)			围封+光伏样地(WG)			自然生长样地(DZ)		
	2013 年	2014 年	2015 年	2013 年	2014 年	2015 年	2013 年	2014 年	2015 年
黏粒	9.09±2.01Ab	9.64±1.12Bb	10.75±2.03Ba	9.34±1.58Ab	10.78±1.53Ab	14.56±2.37Aa	8.75±0.92Aa	9.18±0.83Ba	8.39±1.03Ca
粉砂粒	15.86±0.83Ab	16.82±1.54Aa	17.12±0.98Ba	14.67±1.90Ac	17.24±2.16Ab	19.28±3.04Aa	15.38±1.38Aa	14.93±1.12Ba	15.27±1.48Ca
砂粒	75.05±3.38Aa	73.54±4.03Ba	72.13±2.41Ba	75.99±4.12Aa	71.98±4.35Bb	66.16±4.59Cc	75.87±3.64Aa	75.89±5.34Ba	76.34±5.25Aa
pH	8.93±0.04Aa	8.82±0.07Aa	8.61±0.03Aa	8.90±0.06Aa	8.75±0.09Aa	8.57±0.05Aa	8.91±0.05Aa	8.87±0.04Aa	8.89±0.03Aa
含水量/%	6.17±0.12Ab	8.03±0.20Aa	7.92±0.25Ba	6.25±0.18Ac	8.40±0.26Ab	11.79±0.17Aa	6.02±0.09Aa	6.19±0.14Ba	5.93±0.16Ca

3.5 不同样地土壤有机质及全氮变化特征

土壤和植被是相互影响和制约的,在恢复区域植被群落物种多样性的同时,可以结合土壤性状,进行恢复和重建塔拉滩荒漠草地生态系统。从图 2 可以看出,围封和修建光伏电站对土壤有机质含量具有显著影响(P

<0.05),2013—2015 年 WF 和 WG 样地的 0—20 cm 土壤有机质含量的变化依次是 23.5%,33.6%和 37.7%,36.9%;WF 和 WG 样地的全 N 含量在 2013—2014 年的变化不显著,2014—2015 年分别提高 27.4%和 64.9%;DZ 样地土壤有机质和全氮含量变化均不显著。

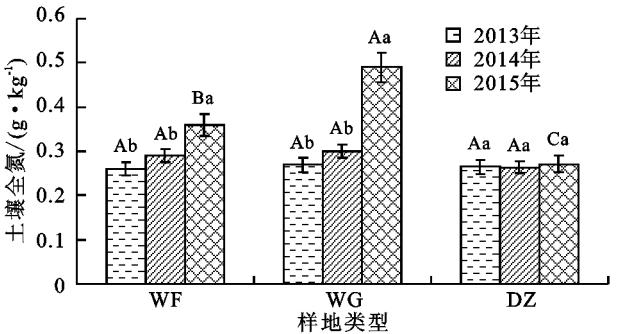
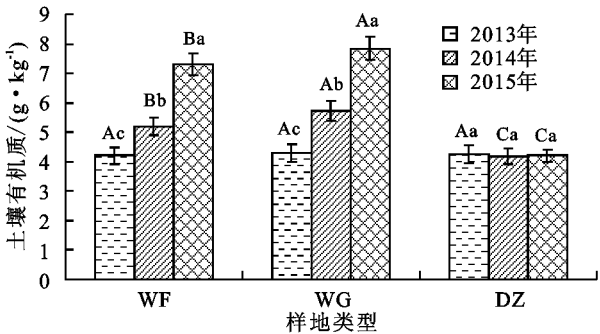


图 2 各样地 0—20 cm 土壤有机质和全氮含量

4 讨论与结论

高寒荒漠草原区生态环境非常恶劣,植被群落结构简单,物种数相对较少,物种丰富度和多样性指数均较小,种间重要值差异较大,最终导致该类型区的植被群落稳定性差,草地生态系统脆弱^[14]。植物的生长发育及其分布格局受到温度、水分及养分等环境因子的限制,使得不同研究区域植物组成不同,进而导致植被群落特征在塔拉滩不同样地中具有明显异质性^[15]。本次研究结果表明:实施封育措施和修建光

伏电厂有利于改善塔拉滩退化高寒荒漠草地的植被群落结构,大幅提高了植物的盖度和地上生物量,促进高寒草地生态系统的稳定和可持续发展。围封+光伏区(WG)植被群落结构复杂,物种数多,丰富度指数、多样性指数和均匀度指数也均较高,这可能因为光伏电板将有限的水热资源进行了再分配,改善了周围小气候,自然条件较优越,有利于植物生长繁殖。土壤中各个养分因子并不是单独起作用的,它们之间影响和存在制约关系,且受到气候因子和植被群

落的影响,即气候、土壤等环境因子和植被是相互作用的^[16]。目前关于植被多样性与土壤性状的研究已有很多,但由于不同区域的土壤影响因子不同、局部微地貌间生境异质性及人类活动干扰,导致不同研究区的试验结果间具有一定的差异^[17-20],但关于土壤有机质和全氮对植被群落多样性和丰富度具有显著影响的研究结果是一致的。因此,在恢复该区域植被多样性的同时,应该结合土壤理化性状特点,以恢复与重建高寒荒漠草原生态系统。

植物的地上和地下部分构成有机的整体,相互影响,其生物量分配模式的变化是植物生活史过程的重要特征,有研究表明,围封禁牧措施可以提高植物群落多样性和改良土壤理化性质,土壤性状反过来又会影响植物对环境变化的响应^[21-22]。在共和盆地塔拉滩围封区相对于自由放牧区有更多的植物种类,并且围栏内植物群落的地上生物量显著高于围栏外植物群落,尤其在光伏发电区植被生长状况与土壤理化状况改良效果更加明显,可能与光伏电板可以促进水分汇集和减少蒸发,促进植被繁育,并且随着植被的恢复,增加地表风沙流中颗粒物沉积有直接关系。

共和盆地的光伏电站主要建在戈壁、荒漠等闲置土地上,经过研究发现,光伏电板不仅能够发电,促进区域经济收入的提高,还能起到保护生态系统和防风固沙的作用,有利于植被恢复和土壤改良。与自然生长样地相比,植物种数增加 116.7%,盖度提高 83.9%,地上生物量增加 68.7%,丰富度指数升高 119.2%,土壤含水量提高 88.6%,有机质含量提高 83.0%,全氮含量增加 81.8%。但是由于本次研究仅仅分析了塔拉滩高寒荒漠草原土壤理化因子与高寒植被多样性的关系,对于土壤中各种盐离子、微生物与植物的相互作用有待进一步探讨。

参考文献:

- [1] 徐叔鹰,徐德馥,石生仁. 共和盆地地貌发育与环境演化探讨[J]. 兰州大学学报(自然科学版),1984,20(1):146-157.
- [2] 郭连云,熊联胜,王万满. 近 50 年气候变化对塔拉滩草地荒漠化的影响[J]. 水土保持研究,2008,15(6):57-63.
- [3] 张翀,李强,李忠峰. 三江源地区人类活动对植被覆盖的影响[J]. 中国人口·资源与环境,2014,24(5):139-144.
- [4] 张登山,高尚玉,石蒙沂,等. 青海高原土地沙漠化及其防治[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [5] 马玉军,沙占江,陈学俭,等. 青海省共和盆地 20 年来沙漠化土地变化[J]. 干旱区资源与环境,2016,30(2):176-181.
- [6] 严琼. 青海绿色生态产业发展战略选择[J]. 攀登,2016,35(1):106-111.
- [7] 魏占雄,郭连云,谢卫东,等. 塔拉滩草地荒漠化成因分析及防治措施探讨[J]. 草原与草坪,2009(2):33-40.
- [8] 魏婷婷,杨占武,李秀梅,等. 共和盆地沙质荒漠化过程植被群落特征变化[J]. 生态环境学报,2011,20(12):1788-1793.
- [9] 王学全,尹书乐,杨占武,等. 共和盆地塔拉滩不同类型草地群落组成与土壤特性[J]. 林业科学研究,2015,28(3):346-351.
- [10] Sun F, Chen W, Liu L, et al. Effects of plateau pika activities on seasonal plant biomass and soil properties in the alpine meadow ecosystems of the Tibetan Plateau [J]. Grassland Science, 2015, 61(4):195-203.
- [11] 董光荣,高尚玉,金炯,等. 青海共和盆地土地沙漠化与防治途径[M]. 北京:科学出版社,1993.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 第 3 版. 北京:中国农业出版社,2007.
- [13] 刘艳书,樊江文,李愈哲,等. 三江源地区不同剥蚀退化高寒草甸群落生物量与多样性特征[J]. 草业学报,2014,23(3):1-7.
- [14] Shen R C, Xu M, Li R Q, et al. Spatial variability of soil microbial biomass and its relationships with edaphic, vegetational and climatic factors in the Three-River Headwaters region on Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Applied Soil Ecology, 2015, 95(11):191-203.
- [15] 周华坤,赵新全,温军,等. 黄河源区高寒草原的植被退化与土壤退化特征[J]. 草业学报,2012,21(5):1-11.
- [16] 顾振宽,杜国祯,朱炜歆,等. 青藏高原东部不同草地类型土壤养分的分布规律[J]. 草业科学,2012,29(4):507-512.
- [17] 蒋德明,苗仁辉,周全来. 封育对科尔沁沙地植被恢复和土壤特性的影响[J]. 生态环境学报,2013,22(1):40-46.
- [18] 翟夏杰,黄顶,王堃. 围封与放牧对典型草原植被和土壤的影响[J]. 中国草地学报,2015,37(6):73-78.
- [19] 王蒙,董治宝,罗万银,等. 巴丹吉林沙漠南缘植被物种多样性及其与土壤特性的关系[J]. 西北植物学报,2015,35(2):379-388.
- [20] 施明,王锐,孙权,等. 腾格里沙漠边缘区植被恢复与土壤养分变化研究[J]. 水土保持通报,2013,33(6):107-111.
- [21] 李媛媛,董世魁,李小艳,等. 围栏封育对黄河源区退化高寒草地植被组成及生物量的影响[J]. 草地学报,2012,20(2):275-279.
- [22] 蒲琴,胡玉福,李亨伟,等. 高寒草地 2 种固沙灌木根际土壤碳氮特征[J]. 水土保持学报,2016,30(2):272-276.