

降雨侵蚀对退化草地土壤养分含量的影响

李国荣^{1,2}, 李希来¹, 陈文婷^{1,2}, 李进芳¹, 朱海丽^{1,2}, 钟伶志¹

(1. 青海大学, 西宁 810016; 2. 青藏高原北缘新生代资源环境重点实验室, 西宁 810016)

摘要:为了阐明高寒草甸降雨侵蚀对退化草地土壤养分的影响,以黄河源区退化草地为研究对象,通过野外模拟降雨试验和室内测试,对退化草地土壤养分流失规律进行了分析,这对于揭示高寒草甸草地退化机理和三江源生态环境保护具有重要意义。结果表明:草地退化区土壤养分含量随土层深度的增加而递减,其中 40 cm 范围内的递减幅度较明显;同等条件下坡度为 10° 的重度退化区土壤养分含量比中度退化区和轻度退化区分别降低了 4.2%~49.9% 和 14.9%~79.4%,而坡度为 20° 和 30° 的退化区表层土壤总养分含量均小于 10° 退化区,且草地退化越严重,则表层土壤略呈弱碱性。与 10° 退化区相比较,20° 和 30° 的重度退化区养分指标分别降低了 5.6%~18.3% 和 12.2%~44.7%;坡面土壤养分流失主要集中在降雨开始后的 30 min 内,其流失幅度达 24.6%~66.4%,其中腐殖质的流失最大,其次为碱解氮、有机质、全氮、速效钾和速效磷,全磷、速效磷和全钾的变化幅度相对较小。降雨侵蚀作用下高寒草甸退化草地的养分流失量比黄土区及人工种植区均大,反映了高寒草地区养分流失是草地退化的原因之一。

关键词:黄河源区; 降雨侵蚀; 退化草地; 土壤养分; 水土流失

中图分类号: S157.1; S158.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)02-0040-06

Influences of Rain Erosion on Soil Nutrient Contents of the Deteriorated Grassland

LI Guorong^{1,2}, LI Xilai¹, CHEN Wenting^{1,2}, LI Jinfang¹, ZHU Haili^{1,2}, ZHONG Lingzhi¹

(1. Qinghai University, Xining 810016, China; 2. Key Lab of Cenozoic

Resources & Environment in North Margin of the Tibetan Plateau, Xining 810016, China)

Abstract: In order to study the influences and rule of rain erosion on soil nutrition contents of the deteriorated alpine meadow, the change rule of soil nutrition content with the variation of soil depth, gradient, degeneration degree and rain erosion were tested and analyzed, and the deteriorated grassland in the Yellow River source region was taken as the study object. This paper had the important significance of revealing the deteriorated mechanism of alpine meadow and the ecological environmental protection of three river source region. The results showed that the soil nutrient contents of deteriorated grassland decreased with the increase of soil depth, gradient and degeneration degree, and the decrease magnitude was obvious at the depth of 40 cm; under the same condition, soil nutrition content of severe degradation area in the slope with degree of 10°, decreased 4.2%~49.9% and 14.9%~79.4% than moderate degradation area and mild degradation area, respectively; the total soil nutrient contents of slope with degrees of 20° and 30° were lower than those of the slope with degree of 10°. The more degenerated, the more alkali in surface soil. When the slope degree increased from 10° to 30°, the nutrient indexes decreased 5.6%~18.3% and 12.2%~44.7%, respectively. The soil nutrients of the hill slope lost along with the runoff, the nutrients in run off mainly concentrated within the 30 min after the beginning of raining, the loss extent reached up to 24.6%~66.4%, among them the loss amount of humus was maximum, followed by available nitrogen, soil organic matter, total nitrogen,

收稿日期: 2017-04-24

修回日期: 2017-06-13

资助项目: 青海省科技厅项目(2016-ZJ-728); 国家自然科学基金(41662023, 41762023); 国家国际科技合作专项项目(2015DFG31870); 教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT_17R62); 青海大学中青年科研资助项目(2015-QGY-10)

第一作者: 李国荣(1979—), 男, 青海贵德人, 博士研究生, 副教授, 主要从事生态环境保护及地质灾害防治方面的教学与研究工作。E-mail: qdliguorong@163.com

通信作者: 李希来(1964—), 男, 河南孟津人, 博士生导师, 教授, 主要从事高原生态修复与环境模拟研究。E-mail: xilai-li@163.com

available potassium and phosphorus, and the variation extents of total phosphorus, available phosphorus and total potassium were relatively smaller. The nutrient loss of deteriorated alpine meadow was more than loess area and artificial planting region under the rain erosion, which reflected that nutrient loss of alpine meadow was one of the reasons for grassland degradation.

Keywords: source area of the Yellow River; rain erosion; degraded grassland; soil nutrition; soil and water loss

高寒草甸是青藏高原特别是三江源地区主要的草地类型,黄河源区地处青藏高原腹地,广泛分布着占据青藏高原绝大部分面积的高寒草甸草地^[1],其在涵养水源、生物多样性保护和碳素固定等方面起着不可替代的生态屏障作用^[2-3]。近年来由于高寒地区生态环境的脆弱性和草甸区域性的严重超载,致使草畜矛盾日益尖锐,生态系统也正在发生着剧烈的变化^[4-6]。土壤养分状况对于植物的生长起着关键性的作用,直接影响着植被群落的组成、结构与生产力水平^[7],土壤有机碳、全氮、全磷和全钾等可能受一些独特环境因子的影响,土壤养分流失进一步加剧了植被退化和生态环境失衡^[8-10]。因此,研究退化草地的土壤养分流失规律,对于深入分析高寒草甸区草地退化机理具有重要意义。

高寒草地土壤养分流失不仅与过度放牧、鼠害有关^[11-15],也与风蚀作用^[16-18]、冻融破坏作用等有关^[19-21]。近年来诸多学者研究认为草地退化后土壤侵蚀伴随着土壤养分的流失,也加剧了水土流失^[22-23]。林春英等^[24]研究认为土壤养分在垂直方向上表现出上层高于下层的规律,且土壤养分随退化程度和土层深度的增加而递减^[25-27]。周俊等^[28]提出径流和泥沙运移是土壤养分流失的主要途径之一,98%的养分是随泥沙流失而流失的。Xi等^[29]研究认为土壤中N的输入对降水或雨量的减少比较敏感,水蚀作用下高寒草地土壤有机碳分布表现为沿坡面迁移的特征,且差异显著^[30]。目前有关降雨条件下土壤养分流失方面的研究较多,但涉及高寒退化草地土壤养分随降雨侵蚀的流失规律有待于进一步深入研究,尤其是量化分析降雨侵蚀作用下土壤养分随坡度和草地退化程度的变化规律,对于揭示高寒草甸草地退化机理具有重要意义,也为三江源植被恢复和生态环境保护提供科学依据。

1 试验材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于青海省黄南州河南县,属黄河源高寒草甸区,地理位置为东经101°47′,北纬34°44′,区内海拔约3 600 m,具有典型的高原大陆性气候特点,年均气温在-1.3~1.6℃^[31];年平均降水量为630.7

mm,平均蒸发量为1 442.9 mm,极端最高气温为24.6℃,极端最低气温为-30.2℃^[32-33]。该地区每年11月一次年4月份为寒冷、干燥、多大风天气,最大风速达到23.7 m/s。该地区地势复杂,气候恶劣,在鼠害、水蚀、风蚀等因素影响下原生草甸出现秃斑、裸露和破碎化现象。地形地貌以河流、河漫滩湿地、阶地、山地为主^[34],土壤类型为高山草甸土,植被主要为矮嵩草(*Kobresia humilis*)、线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*)、高山嵩草(*Kobresia pygmaea*),草甸退化区分布有黄花棘豆(*Oxytropis ochrocephala*)、鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、乳白香青(*Anaphalis lactea*)、高原毛茛(*Ranunculus tanguticus*)等。该地区土壤总体特征是土层年轻,土层薄,有机质分解慢,肥效低^[35],且每年的6—9月份降雨比较集中,从而加剧了退化草地的水土流失现象,给区域生态环境和畜牧业发展带来重要影响^[31]。

1.2 试验设计与方法

试验小区样方规格设定为2 m×2 m,其中退化草地的坡度初步拟选10°,20°,30°共3种坡度类型,并根据植被退化程度的差异,划分轻度退化(覆盖度为70%~90%)、中度退化(覆盖度为40%~60%)和重度退化(覆盖度为10%~30%)3种退化区等级。

(1) 土层剖面的土壤养分测定:以10°的中度退化草地为对象,从地表开始每隔10 cm取样1次,每次取样设定5次重复。根据野外退化区土层剖面观测,植被根系的分布深度主要在40 cm以内,而试验中取样最大深度设定为70 cm。

(2) 不同草地退化区土壤养分测定:在3种坡度、3种退化区内分别取样,取样深度为表层1—2 cm土层内,取样时不同坡度、不同退化区及每个小区的样品采集各重复5次。

(3) 降雨条件下土壤养分流失规律试验:以坡度为20°的中度退化区为研究对象,测试时间为2016年7—8月降雨比较集中的时期,采用野外人工模拟降雨装置开展野外现场模拟降雨,降雨强度设定为30 mm/h,降雨历时为1 h,取样时每隔5 min收集被冲刷运移的泥沙,然后带回实验室进行养分测定。由于模拟降雨的工作量较大,故不同小区只设定3次重复。

上述土壤养分的测试指标主要包括土壤有机质、土壤腐殖质以及土壤全氮、碱解氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾、pH 值,每次取完样品并经密封后带回实验室进行测试和分析。已有文献资料中有关土壤腐殖质的流失特征分析相对较少,但考虑到腐殖质是土壤有机质的重要组成部分,具有重要的肥力和环境调节功能^[36],其含量和构成不仅反映土壤肥力质量和养分循环特征^[37],也对评价降雨侵蚀作用下坡面养分流失特征有重要参考意义,因此在试验中也对土壤腐殖质进行了测试,其测试方法采用比色法测定^[38]。

2 结果与分析

2.1 土壤养分随土层深度的变化规律

土壤养分含量指标是评价植被生长区土壤肥力的重要因子,养分含量的差异,直接影响土壤培育植被、改善生态环境的能力^[39]。试验结果表明,高寒退化草地区土壤养分主要分布在距地表 80 cm 的土

层中,其含量变化随土层深度的增加呈递减趋势。从图 1 中可以看出,土壤养分主要集中在地表土层中,且距地表 40 cm 内的土层中,养分含量随土层深度的增加而递减的趋势较明显,其中与坡面土壤相比,深度为 10 cm 的土壤有机质、腐殖质、全氮、速效钾、速效磷和碱解氮含量分别降低了 28.2%, 42.5%, 24.7%, 31.0%, 37.7% 和 26.0%。分析认为,出现上述变化规律的主要原因是土壤有机质、腐殖质和部分养分指标来源于植物的枯枝落叶和腐朽根系,而草地表层是草地植被落叶和根系的密集区,因此表层土壤中的养分含量均较高。此外,从野外草甸区土层剖面可以看出,大部分植被根系分布范围也在地表 0—40 cm 范围内(图 2),其为土壤中积累各类养分含量创造了条件,而且植被覆盖越大、越接近地表,土壤有机质、腐殖质及其他养分的积累量越高,说明植被枯枝落叶和腐烂根系对土壤养分的积累具有重要作用和意义。

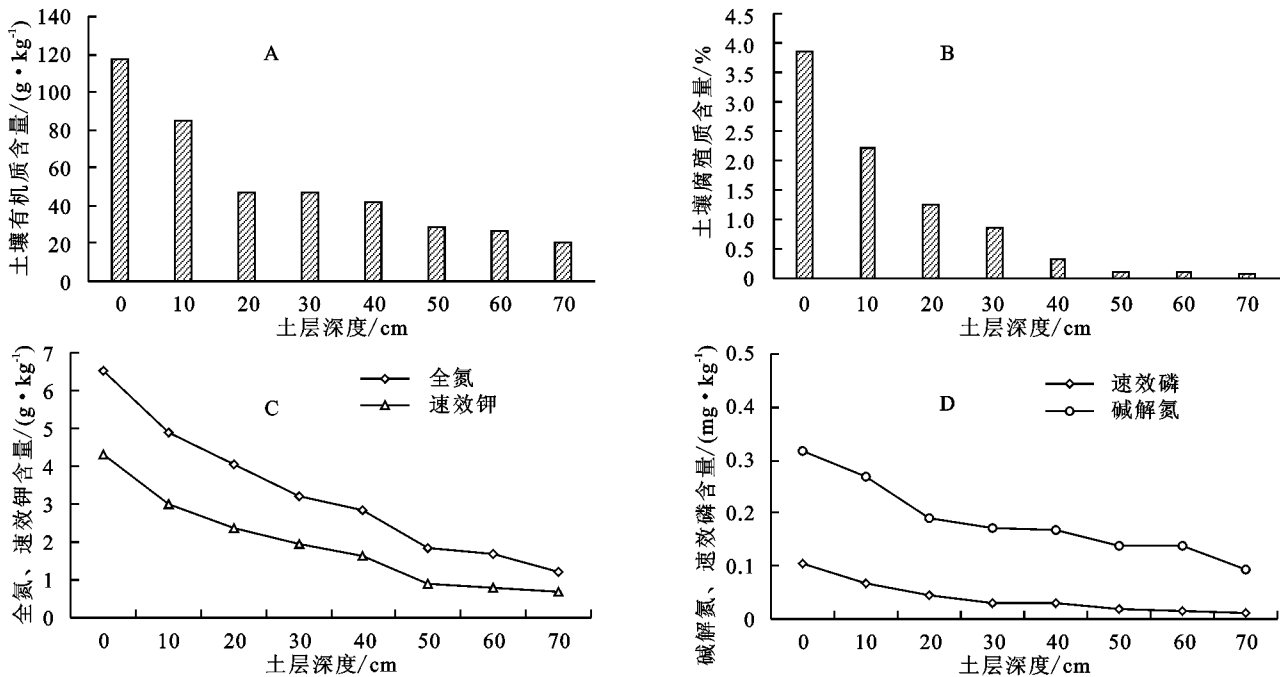


图 1 土壤养分随土层深度的变化规律

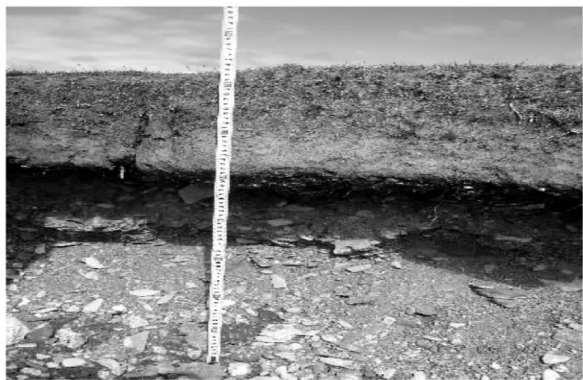


图 2 高寒草甸土层及植被根系分布剖面

2.2 不同草地退化区土壤养分含量变化规律

根据野外观测发现,高寒草甸退化草地区域均有不同程度的水土流失现象,且养分含量随坡度和退化程度存在差异。测试结果表明,在退化程度相同时,土壤表层的养分含量随坡度的增大而减小;坡度相同的情况下,土壤表层的养分含量随退化程度的加剧而减小,且草地退化越严重,则表层土壤略呈弱碱性,测试结果见表 1。从测试数据得出,坡度相同的情况下,土壤养分的测试指标均随草地退化的加剧而呈现下降趋势,其中以 10° 边坡为例,重度退化区的土壤有机质、腐殖质、全氮、碱解氮、速

效钾、速效磷、全磷和全钾的含量比中度退化区分别降低了 49.9%,49.7%,49.5%,28.1%,38.4%,23.4%,11.3%和 4.2%,比轻度退化区分别降低了 79.4%,60.4%,67.5%,67.6%,78.9%,56.1%,28.3%和 14.9%,与 10°退化区相比较,20°和 30°退化区的养分含量随草地退化程度的下降幅度相对较大。此外,以重度退化区为例进行分析后得出,

天然退化草地表层土壤养分含量均随坡度的增加而减小,其中与 10°草地相比,坡度为 20°的重度退化区表层土壤有机质、腐殖质、全氮、碱解氮、速效钾的含量分别降低了 7.4%,18.3%,11.3%,15.2%,5.6%,30°的区域分别降低了 44.7%,32.0%,41.8%,18.5%,12.2%,其全磷、速效磷和全钾含量相比于 30°草地,降低幅度在 5%以内。

表 1 不同草地退化区表层土壤养分含量测试结果

坡度/ (°)	退化 程度	有机质/ (g·kg ⁻¹)	腐殖质/ %	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (g·kg ⁻¹)	pH 值
10	重度	23.97	1.69	1.41	1.65	20.89	92	8.2	90	8.09
	中度	47.81	3.36	2.79	1.86	21.80	128	10.7	146	7.90
	轻度	116.34	4.27	4.34	2.30	24.55	284	18.7	427	7.31
20	重度	22.20	1.38	1.25	1.61	20.93	78	7.8	85	8.10
	中度	47.81	3.36	2.56	1.86	21.80	128	10.7	146	7.90
	轻度	60.69	3.83	3.43	2.06	23.70	252	16.9	348	7.65
30	重度	13.25	1.15	0.82	1.57	19.97	75	8.0	79	8.27
	中度	39.92	2.92	2.12	1.75	22.76	124	10.2	113	7.95
	轻度	58.57	3.24	3.29	1.93	23.67	238	12.4	247	7.52

注:表中的测试结果为 5 个重复样品的平均值。

2.3 降雨侵蚀作用下土壤养分流失规律

降雨侵蚀产生退化草地表层土壤颗粒和养分的流失,也对植被的生长和繁殖造成一定的影响。试验结果表明,随着降雨的持续进行,草地退化区坡面土壤养分随着径流和冲刷的泥沙一起流失,其中土壤有机质、腐殖质、碱解氮和速效钾的流失量比较明显。从图 3 中可以看出,地表土壤养分的流失主要集中在降雨开始后的 30 min 内,且流失最大的是腐殖质,其流失幅度为 66.4%,其次为碱解氮、有机质、全氮、速效钾和速效磷,

其流失幅度分别为 65.5%,56.7%,56.3%,53.4%和 24.6%,全磷和全钾含量随降雨侵蚀的变化幅度相对较小,分别为 8.8%和 3.8%;降雨持续 30 min 后,由于坡面根—土结构趋于稳定,土壤颗粒及养分流失趋势趋于缓和。分析认为,降雨初期土壤坡面松散颗粒较多,土壤颗粒随径流迅速流失^[40],养分随着径流和泥沙运移,且降雨持续时间越长,径流量和泥沙量也随之增加,土壤养分流失加剧^[41],说明降雨侵蚀产生的径流是土壤颗粒和养分流失的主动动力。

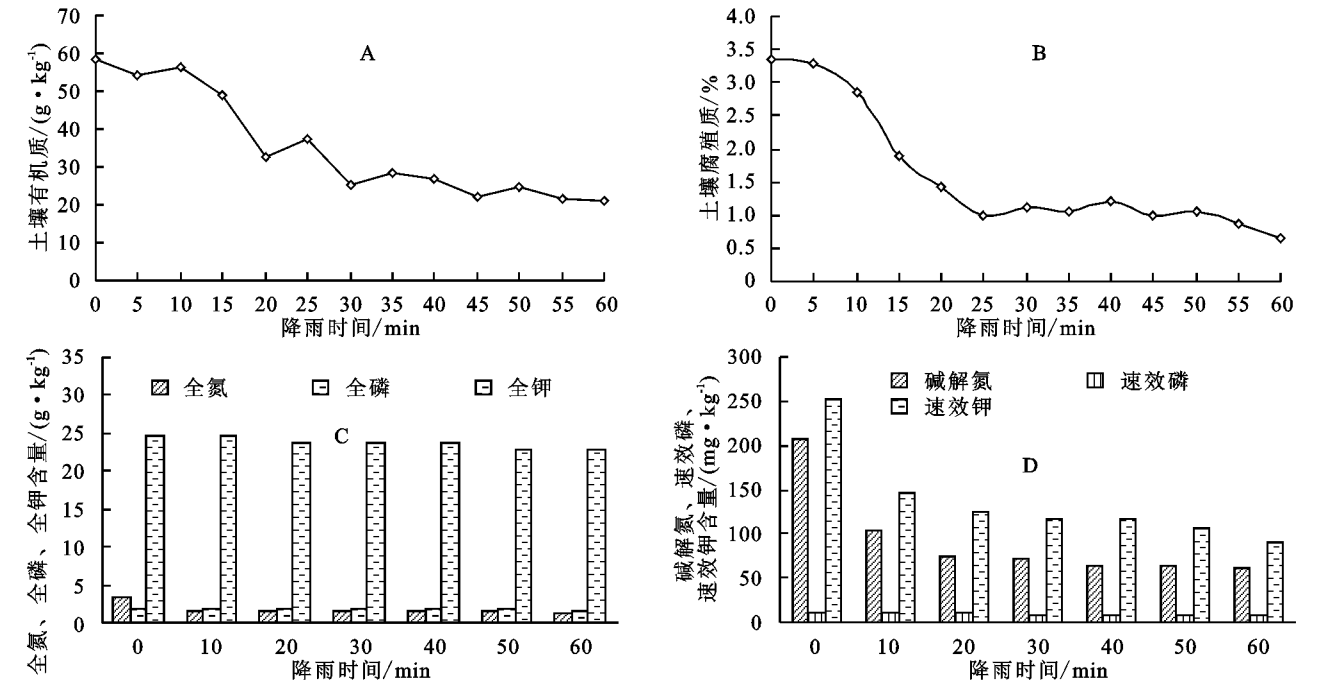


图 3 土壤养分含量随降雨时间的变化

为了对比分析相同覆盖和降雨条件下不同区域养分流失量,评价高寒退化草地区表层土壤养分流失特点,试验中也对同等条件下的黄土草本覆盖区也进行了原位测试,并计算了表层土壤养分流失量,测试及计算结果见表 2。

试验结果表明,同等条件下各区域的有机质、腐殖质、全钾、全磷、全氮的流失量相对较大,其次为速效钾、碱解氮和速效磷,其中高寒退化草地区表层土

壤养分流失量明显大于黄土区($p>0.05$),且计算出高寒草甸区所有养分指标的总流失率为 38.5%,黄土区总流失率为 41.2%。分析认为高寒退化草地根—土结构相对致密,草地植被生长中所积累的养分较多,因此在降雨侵蚀作用下退化区表层土壤养分流失量相对较大,而黄土区地表积累的养分相对较少,且土壤结构松散,降雨侵蚀产生的泥沙流失量相对较大,其养分总流失率较大。

表 2 高寒草地退化区与黄土区表层土壤养分流失量

区域类型	有机质/ g	腐殖质/ g	全氮/ mg	全磷/ mg	全钾/ mg	碱解氮/ mg	速效磷/ mg	速效钾/ mg
高寒草地区	1.904	1.019	46.376	52.514	653.90	3.203	0.304	4.476
黄土区	0.153	0.216	7.674	23.954	265.726	0.325	0.152	1.786

根据文献资料,戴矜君等^[42]在坡度为 10°的土槽中通过人工种植紫花苜蓿(*Medicago sativa*)和狗尾草(*Setaria virides*),并在降雨强度 3 mm/h、降雨历时 60 min 条件下测试了全氮、全磷和速效钾随径流的流失量。为了进一步对比不同区域土壤养分流失特点,分析时将文献中的流失量进行了等面积计算,结果得出人工种植紫花苜蓿(120 株/m²)后的全氮、全磷和速效钾的流失量分别比草地退化区减小了 24.713,43.390,0.479 mg,种植狗尾草(120 株/m²)后的全氮、全磷和速效钾的流失量分别比草地退化区减小了 22.319,43.053,0.293 mg。上述对比结果说明在降雨侵蚀作用下高寒草甸退化草地的养分流失量均大于黄土区和人工种植试验区,这一结果也反映了高寒草地区养分流失是草地退化的原因之一。

3 结论

(1) 高寒退化草地区土壤养分主要分布在距地表 80 cm 的土层中,养分含量随土层深度的增加而递减,其中 40 cm 范围内养分变化趋势较明显;与坡面表层土壤相比,土层深度增加到 10 cm,则土壤养分含量降低 26.0%~42.5%。

(2) 土壤表层的养分含量随坡度和退化程度的增加而减小;同等条件下坡度为 10°的重度退化区土壤有机质、腐殖质、全氮、碱解氮、速效钾、速效磷、全磷和全钾的含量分别比中度退化区降低了 4.2%~49.9%,比轻度退化区分别降低了 14.9%~79.4%;草地退化越严重,则表层土壤略呈弱碱性。坡度为 20°和 30°的重度退化区表层土壤养分指标比 10°退化区分别降低了 5.6%~18.3%和 12.2%~44.7%,其中全磷、速效磷和全钾也随退化程度的加剧而降低,

但变化幅度相对较小。

(3) 草地退化区坡面土壤养分随径流和冲刷而流失,且养分流失主要集中在降雨开始后的 30 min 内,其中流失最大的是腐殖质,其次为碱解氮、有机质、全氮、速效钾和速效磷,流失幅度达 24.6%~66.4%,速效磷和全磷含量随降雨侵蚀的变化幅度相对较小。降雨侵蚀作用下高寒草甸退化草地的养分流失量比黄土区及人工种植区均大,反映了高寒草地区养分流失是草地退化的原因之一。

参考文献:

- [1] 张懿锂,刘林山,摆万奇,等. 黄河源地区草地退化空间特征[J]. 地理学报,2006,61(1):3-14.
- [2] Ni J. Carbon storage in grasslands of China[J]. Journal of Arid Environments,2002,50(2):205-218.
- [3] 刘敏超,李迪强,栾晓峰,等. 三江源地区生态系统服务功能与价值评估[J]. 植物资源与环境学报,2005,14(1):40-43.
- [4] 王一博,王根绪,张春敏,等. 高寒植被生态系统变化对土壤物理化学性状的影响[J]. 冰川冻土,2007,29(6):921-927.
- [5] 王伟,徐成体. 不同补播年限对河南高寒草甸土壤养分的影响研究[J]. 青海畜牧兽医杂志,2016,46(3):1-4.
- [6] 王建兵,张德罡,曹广民,等. 青藏高原高寒草甸退化演替的分区特征[J]. 草业学报,2013,22(2):1-10.
- [7] 罗亚勇,张宇,张静辉,等. 不同退化阶段高寒草甸土壤化学计量特征[J]. 生态学杂志,2012,31(2):254-260.
- [8] Hobbie S E, Schimel J P, Trumbore S E, et al. Controls over carbon storage and turnover in high-latitude soils[J]. Global Change Biology, 2010,6(S1):196-210.
- [9] Yang Y H, Fang J Y, Guo D L, et al. Vertical patterns of soil carbon, nitrogen and carbon: nitrogen stoichiometry in Tibetan grasslands[J]. Biogeosciences Discussions,2010,7:1-24.

- [10] 周丽,张德罡,负旭江,等. 退化高寒草甸植被与土壤特征[J]. 草业科学,2016,33(11):2196-2201.
- [11] 胡雷,阿的鲁骥,字洪标,等. 高原鼯鼠扰动及恢复年限对高寒草甸土壤养分和微生物功能多样性的影响[J]. 应用生态学报,2015,26(9):2794-2802.
- [12] 张生楹,张德罡,柳小妮,等. 开垦利用对东祁连山高寒灌丛草地土壤养分含量的影响[J]. 甘肃农业大学学报,2012,47(2):80-84.
- [13] 罗亚勇,孟庆涛,张静辉,等. 青藏高原东缘高寒草甸退化过程中植物群落物种多样性、生产力与土壤特性的关系[J]. 冰川冻土,2014,36(5):1298-1305.
- [14] 徐广平. 东祁连山不同退化程度高寒草甸植被与土壤养分变化研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2006.
- [15] 李文,曹文侠,李小龙,等. 放牧管理模式对高寒草甸草原土壤养分特征的影响[J]. 草原与草坪,2016,36(2):8-13.
- [16] Tuo D F, Xu M X, Zhao Y G, et al. Interactions between wind and water erosion change sediment yield and particle distribution under simulated conditions [J]. Journal of Arid Land,2015,7(5):590-598.
- [17] Li J R, Gregory S O, Lorelei A, et al. Effects of wind erosion on the spatial heterogeneity of soil nutrients in two desert grassland communities[J]. Biogeochemistry,2008,88(1):73-88.
- [18] Yan Y C, Xin X P, Xu X L, et al. Quantitative effects of wind erosion on the soil texture and soil nutrients under different vegetation coverage in a semiarid steppe of northern China[J]. Plant and Soil,2013,369(1):585-598.
- [19] Schuerings J, Carl B, Kerstin G, et al. Absence of soil frost affects plant-soil interactions in temperate grasslands[J]. Plant and Soil, 2013,371(1):559-572.
- [20] Semenov V M, Kogut B M, Lukin S M. Effect of repeated drying-wetting-freezing-thawing cycles on the active soil organic carbon pool[J]. Eurasian Soil Science, 2014,47(4):276-286.
- [21] 范昊明,李贵圆,周丽丽,等. 冻融作用对草甸土物理力学性质的影响[J]. 沈阳农业大学学报,2011,42(1):114-117.
- [22] Adugna A, Abegaz A, Cerdà A. Soil erosion assessment and control in Northeast Wollega, Ethiopia[J]. Solid Earth Discussions, 2015,7(4):3511-3540.
- [23] 刘国华,傅伯杰,陈利顶,等. 中国生态退化的主要类型、特征及分布[J]. 生态学报,2000,20(1):14-20.
- [24] 林春英,李希来,金惠琰,等. 黄河源区河漫滩湿地退化过程土壤的变化特征[J]. 中国农学通报,2015,31(33):243-249.
- [25] 秦嘉海,张勇,赵芸晨,等. 祁连山黑河上游不同退化草地土壤理化性质及养分和酶活性的变化规律[J]. 冰川冻土,2014,36(2):335-346.
- [26] 杨元武,李希来,周华坤. 高寒草甸退化草地土壤特性分析[J]. 安徽农业科学,2011,39(24):14687-14690.
- [27] 王平,孙涛. 高山退化草地不同恢复措施对土壤理化性质的影响[J]. 水土保持研究,2014,21(4):31-34.
- [28] 周俊,朱江,蔡俊. 合肥近郊旱地土壤肥力与降雨强度的关系[J]. 水土保持学报,2000,14(3):92-95.
- [29] Xi N X, Pascal C, Juliette M G B. Plant community responses to precipitation and spatial pattern of nitrogen supply in an experimental grassland ecosystem[J]. Oecologia, 2015,178(2):329-338.
- [30] 孙文义,邵全琴,刘纪远,等. 三江源典型高寒草地坡面土壤有机碳变化特征及其影响因素[J]. 自然资源学报,2011,26(12):2072-2086.
- [31] 陆阿飞. 三江源区河南县草地植被退化状况及解决措施[J]. 青海畜牧兽医杂志,2014,44(6):57-58.
- [32] 祁如英,李应业,魏永林,等. 青海牧区近10年牧草产量变化与气象条件的关系[J]. 气象科技,2011,39(3):369-373.
- [33] 张宝成,白艳芬. 气候变暖对青藏高原高寒草甸生产力的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医,2016(5):154-156.
- [34] 张海娟,谢久祥,李希来. 青海河南县高原鼠兔的分布及其与土壤特性的相关性分析[J]. 青海大学学报:自然科学版,2016,34(1):13-21.
- [35] 蒋中文. 黄南州河南县植被特点与保护利用意见[J]. 青海环境,2013,23(3):143-148.
- [36] 王鑫,王金成,刘建新. 不同恢复阶段人工沙棘林土壤腐殖质组成及性质[J]. 水土保持通报,2014,34(5):49-54.
- [37] 张晓曦,刘增文,朱博超,等. 半干旱黄土丘陵区纯林土壤腐殖质异化特征及与其他性质的关系[J]. 生态学报,2015,35(6):1779-1787.
- [38] 杨俐苹,白由路,王向阳,等. 比色法测定土壤腐殖质组分的研究[J]. 腐植酸,2011(1):15-19.
- [39] 刘效东,乔玉娜,周国逸. 土壤有机质对土壤水分保持及其有效性的控制作用[J]. 植物生态学报,2011,35(12):1209-1218.
- [40] 郭铁瑞,赵哈林,赵学勇,等. 科尔沁沙地结皮发育对土壤理化性质影响的研究[J]. 水土保持学报,2007,21(1):135-139.
- [41] Sharpley A N. The enrichment of soil phosphorus in runoff sediments[J]. Journal of Environmental Quality,1980,9(3):521-526.
- [42] 戴矜君,程金花,张洪洪,等. 草被覆盖对养分迁移机制的影响[J]. 水土保持学报,2016,30(3):147-153.