

DOI: 10.5846/stxb201501140111

蒋双龙, 胡玉福, 蒲琴, 舒向阳, 袁铨铭, 余倩. 川西北高寒草地沙化过程中土壤氮素变化特征. 生态学报, 2016, 36(15): - .
Jiang S L, Hu Y F, Pu Q, Shu X Y, Yuan C M, Yu Q. Changes in soil nitrogen characteristics during grassland desertification in Northwest Sichuan. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(15): - .

川西北高寒草地沙化过程中土壤氮素变化特征

蒋双龙, 胡玉福*, 蒲 琴, 舒向阳, 袁铨铭, 余 倩

四川农业大学 资源环境学院, 成都 611130

摘要: 草地沙化是我国最严重的环境问题之一, 但关于草地沙化过程中氮素变化特征的研究报道多集中于干旱半干旱地区, 而半湿润地区的相关报道还比较缺乏。本文通过野外调查, 研究了川西北半湿润地区高寒沙质草地沙化过程中土壤氮素变化特征。结果表明, 草地沙化对 0—100 cm 土层土壤氮素具有显著影响, 全氮、碱解氮、铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) 和微生物量氮 (MBN, Microbial biomass nitrogen) 均呈现极显著下降的变化特征, 极度沙化阶段较未沙化阶段分别减少了 73.95%、77.72%、76.75%、79.77% 和 84.12%。其中, 0—20 cm 土层变化最显著, 全氮、碱解氮、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 MBN 含量分别减少了 86.43%、83.52%、82.11%、88.82% 和 91.77%。随着土层深度增加, 不同程度沙化草地土壤氮素含量及其变化量逐渐减少; 草地沙化过程中, 不同沙化阶段土壤氮素损失数量不尽相同, 其中, 以轻度沙化阶段氮素损失最严重, 全氮、碱解氮、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 MBN 含量分别降低了 41.18%、35.17%、46.74%、43.46% 和 46.88%。草地沙化过程中, 土壤全氮、碱解氮、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 MBN 含量与土壤粉粒、粘粒含量和植被群落盖度均呈极显著正相关特征, 与土壤沙粒含量呈极显著负相关特征。研究区土壤氮素损失与风蚀选择性吹蚀土壤粉粒、粘粒及地表植物覆盖状况逐渐变差密切相关, 因此该区域治沙的关键是采取措施降低风蚀对地表土壤吹蚀作用, 提高沙化草地地表植被覆盖。同时, 还应及时对沙化前期阶段及潜在沙化的草地进行生态治理, 从而避免草地沙化继续恶化。

关键词: 川西北; 沙化草地; 全氮; 碱解氮; $\text{NH}_4^+\text{-N}$; $\text{NO}_3^-\text{-N}$; MBN

Changes in soil nitrogen characteristics during grassland desertification in Northwest Sichuan

JIANG Shuanglong, HU Yufu*, PU Qin, SHU Xiangyang, YUAN Chengming, YU Qian

College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

Abstract: Grassland desertification is one of the most serious environmental problems in China. However, many studies examining changes in nitrogen characteristics during grassland desertification have focused on arid or semi-arid regions, and few studies have considered semi-humid regions. In this study, the soil nitrogen content during the process of desertification in a northwest Sichuan alpine area, a semi-humid region, was analyzed. Desertification had a significant impact on soil nitrogen in the 0–100-cm soil layer, and total nitrogen, available nitrogen, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, and microbial biomass nitrogen (MBN) decreased significantly during the process of grassland desertification by 73.95%, 77.72%, 76.75%, 79.77%, and 84.12%, respectively. Total nitrogen, available nitrogen, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, and MBN decreased most strongly in the 0–20-cm soil layer among all layers within 0–100 cm (by 86.43%, 83.52%, 82.11%, 88.82%, and 91.77%, respectively). As the soil depth increased, both the content and degree of change during grassland desertification gradually decreased. The extent of the decrease in soil nitrogen content varied during the progression of grassland desertification. During

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2008BAK51B02); 四川省科技计划项目 (2013SZ0110, 2014SZ0057, 2014SZ0159)

收稿日期: 2015-01-14; **网络出版日期:** 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 66433119@qq.com

the early degradation stage, soil nitrogen decreased the most; the total nitrogen, available nitrogen, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and MBN decreased 41.18%, 35.17%, 46.74%, 43.46%, and 46.88%, respectively. Based on these results, the changes in soil nitrogen observed as the degree of desertification increased in semi-humid regions were similar to those observed in previous studies for arid and semi-arid regions. Plants are important for the sequestration of soil nitrogen, not only because they act as nitrogen sources, but also because they protect soil containing nitrogen from blowing away. A correlation analysis showed that total nitrogen, available nitrogen, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and MBN were all significantly positively correlated with community coverage ($p < 0.01$). In addition, total nitrogen, available nitrogen, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and MBN were all significantly positively correlated with silt and clay, which have high nitrogen contents ($p < 0.01$). In contrast, coarse sand lacking nitrogen was significantly negatively correlated with total nitrogen, available nitrogen, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and MBN ($p < 0.01$). Based on these results, we inferred that soil nitrogen loss was caused by a gradual decrease in community coverage during grassland desertification, and the loss of silt and clay via wind erosion. Consequently, efficient measures should be taken to protect silt and clay from wind erosion, and to improve community coverage during the desertification of grassland. In addition, potential grassland desertification, particularly during the early stage, should be managed using ecological methods to avoid the negative effects of increasing grassland desertification.

Key Words: Northwestern Sichuan; Desertification grassland; Total nitrogen; $\text{NH}_4^+\text{-N}$; $\text{NO}_3^-\text{-N}$; MBN

沙漠化是土地荒漠化的主要类型之一,它不仅能够导致土壤沙化和风沙地貌的形成,还会引起土地生产潜力明显降低,是世界上多数干旱半干旱地区及部分半湿润地区最严重的社会与环境问题之一^[1-5]。土壤氮素对土壤的物理、化学、生态性状和土壤肥力等具有重要作用,是植物生长发育的必须元素^[6-9]。张珂等^[10]研究指出,土壤氮素是限制荒漠化植物生长最主要的营养元素。因此,掌握沙漠化过程中土壤氮素的变化特征及土壤氮素与土地沙漠化的关系,对于维系土壤质量,保护环境等方面均有极为重要的积极作用,也有利于掌握沙漠化对土壤肥力的影响机制^[4,11-13]。近年来,我国关于沙漠化土地土壤氮素的研究主要集中在草地生态系统^[5,14-19],但这些研究多针对于我国干旱半干旱地区草地沙化过程中土壤氮素的变化,而对于我国半湿润地区草地沙化过程中土壤氮素的变化关注和研究较少。此外,已有相关研究报道多局限于草地沙化过程中土壤全氮、碱解氮的变化特征,而关于草地沙化过程中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 MBN 等植物可直接吸收利用的氮素的相关报道相对缺乏。

川西北高寒草原地处青藏高原东部边缘半湿润地区,是我国长江、黄河两大水系的重要水源涵养区,还是世界上最大的高原泥炭沼泽湿地^[20],对保护我国生态环境安全具有极为重要的作用。但受长期的风蚀气候影响,及近几十年来超载放牧、人类活动强度加大等因素影响,川西北高寒草地退化严重,导致成片草地沙化,严重制约了该地区社会经济的可持续发展,削弱了该地区生态环境屏障的作用。已有研究表明,1994—2009年间该地区沙化总面积增加了 28.1%,截止 2009 年沙化土地面积达 82.19 万 hm^2 ,占四川全省沙化土地面积的 89.9%^[21-23]。因此,本文通过野外勘查,采取空间代替时间的方法,对川西北高寒草原不同程度沙化草地土壤全氮、碱解氮、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、MBN 等进行研究,以期揭示该地区草地沙化过程中土壤氮素的变化特征,为该区域草地沙化机制的探讨及沙化草地生态恢复等提供理论参考。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

研究区地处四川阿坝藏族羌族自治州红原县境内,境域分属长江、黄河两大水系,地势由东南向西北倾斜,地貌具有山原向丘状高原过渡的典型特征。气候属大陆性高原寒温带季风气候,春秋短促、长冬无夏。年均降雨量 791.95mm,降雨主要集中在 5—10 月,年均气温为 0.9℃,最冷月平均气温 -10.3℃,最热月平均气温 10.9℃,年均积雪期为 76d,无绝对的无霜期。日照时间长,太阳辐射强,年均日照时间 2158.7 h,太阳辐射年

总量为 6194MJ/m²。土地利用现状以草地为主,也有较大面积的沼泽地和沙化地分布,其中沙化土地总面积约为 6915hm²,主要分布于邛溪镇和瓦切乡境内^[24]。土壤类型以亚高山草甸土为主,沼泽土、沼泽化草甸土和风沙土等也均匀分布^[21]。植被以华扁穗草(*Blysmus sinocompressus*),垂穗披碱草(*Elymus sibiricus*),线叶蒿草(*Kobresia capillifolia*),赖草(*Leymus secalinus*),淡黄香青(*Anaphalis flavescens*),黑穗薹草(*Carex atrata*),沙生薹草(*Carex praeclara*),木里薹草(*Carex muliensis*),细叶亚菊(*Ajania tenuifolia*)等为主,植被组合以亚高山草甸为主,沼泽草甸与沼泽植被较为发达,植物群落外貌鲜艳,富有季相之变化^[25]。

1.2 土壤样品采集

通过实地勘察,本研究在红原县沙化土地分布多而集中的瓦切乡选择采样点。参照前人研究^[2,18],选择不同沙化程度的草地为研究样地,分别为:未沙化草地(CTRL, Non-desertification grassland)、轻度沙化草地(LDG, Light-desertification grassland)、中度沙化草地(MDG, Medium-desertification grassland)、严重沙化草地(HDG, Heavy-desertification grassland)和极重度沙化草地(SDG, Severe-desertification grassland)。5 种沙化类型草地均选择 3 处地形和土壤母质一致的样地作为重复,每个样地内均选取 1 个面积大小为 1m×1m 的样方用于植被信息调查和土壤样品采集,并采用 GPS 定位样方经纬度信息和高程信息(表 1),在选定样方内分别采集 0—20cm、20—40cm、40—60cm、60—80cm 和 80—100cm 土壤样品,去除杂物及植物根系、凋落物等。土壤样品一部分土样冷藏于-4℃冰箱内,于 5 个工作日内测定 MBN、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N,另一部分土样于室内风干,分别过 100 目筛和 10 目筛,保存于密封袋内,用于土壤颗粒组成、全氮和碱解氮的测定。

表 1 草地样方信息记录表
Table 1 Information of desertification grassland quadrat

编号 Number	沙化程度 Desertification degree	地理位置 Position	植物群落特征 Community	沙化现状 Desertification condition
1	未沙化	E102°37'04.36" N33°10'55.23" 海拔 3458m	平均盖度达 90%以上,平均高度	无沙化现象,表层枯枝落叶较多
2		E102°37'06.68" N33°10'54.74" 海拔 3458m	约 25cm,物种丰富度最高,达	
3		E102°35'44.01" N33°15'41.59 海拔 3458m	21—28 种。	
4	轻度沙化	E102°37'06.44" N33°10'55.12" 海拔 3458m	平均盖度为 60%—75 %;平均高	无明显沙化现象,表层枯枝落叶明显减少,部分土壤裸露
5		E102°37'07.84" N33°10'55.04" 海拔 3458m	度约 20cm。物种丰富度较高,	
6		E102°35'54.01" N33°10'41.59" 海拔 3458m	为 18—22 种。	
7	中度沙化	E102°37'08.21" N33°10'54.65" 海拔 3458m	平均盖度为 40%—50 %,平均高	沙化明显,表层枯枝落叶明显减少,形成典型的露沙草地
8		E102°37'07.19" N33°10'50.46" 海拔 3457m	度约 15cm 物种丰富度相对较	
9		E102°36'04.34" N33°11'12.88" 海拔 3459m	高,为 14—17 种。	
10	重度沙化	E102°37'09.63" N33°10'54.59" 海拔 3458m	平均盖度为 20%—35%,平均高	沙化严重,表层沙粒大量增加,枯枝落叶数量极少
11		E102°38'07.44" N33°10'50.13" 海拔 3459m	度约为 10 cm 物种丰富度较低,	
12		E102°35'58.59" N33°11'10.14" 海拔 3459m	为 9—13 种。	
13	极重度沙化	E102°37'10.36" N33°10'53.47" 海拔 3458m	平均盖度低于 10%,平均高度仅	土壤完全沙化,表层无枯枝落叶
14		E102°37'08.72" N33°10'49.82" 海拔 3458m	为 7cm,物种丰富度最低,仅为	
15		E102°36'01.86" N33°11'10.42" 海拔 3460m	3—5 种。	

1.3 测定方法及数据处理

土壤颗粒组成采用比重计法测定,全氮采用半微量开氏法测定,碱解氮采用碱解扩散法测定^[26], NH₄⁺-N 测定采用靛酚蓝比色法^[27], NO₃-N 测定采用双波长紫外分光光度法^[28], MBN 测定采用氯仿熏蒸紫外比色法^[29]。

数据统计、方差分析、相关分析及图表绘制在 EXCEL2010 和 SPSS 17.0 软件下进行。

2 结果分析

2.1 草地沙化过程中地表植被变化特征

不同程度沙化草地地表植物群落外貌变化极其明显,随着沙化程度的增加,群落盖度、植被平均高度和物

种丰度均呈现出急剧下降的变化特征 ($P < 0.01$) (图 1, 图 2)。统计结果表明,未沙化草地群落盖度达 95% 以上,而极重度沙化群落盖度不足 10%,下降幅度达 94.57%;未沙化草地平均株高近 25cm,极重度沙化群落盖度低于 7cm 左右,下降幅度达 71.68%;未沙化草地物种丰度达 20 种以上,极重度沙化则不足 5 种,下降幅度达 83.33%。说明沙化导致草地地表植被状况逐渐变差。

2.2 草地沙化过程中土壤颗粒组成变化特征

土壤颗粒组成是土壤质地和结构的重要表征,而土地沙化的核心问题是土壤颗粒的粗大化^[30]。结果表明,随着草地沙化严重程度增加,0—100cm 土层土壤颗粒组成变化明显,呈现出砂粒 ($>0.05\text{mm}$) 含量增加,粉粒 ($<0.01\text{mm}$)、黏粒 ($0.01—0.05\text{mm}$) 含量减少的变化特征,其中,极重度沙化草地较未沙化草地沙粒含量增加了 9.49%,粉粒和粘粒含量分别减少了 78.43% 和 60.59% ($P < 0.05$) (表 2);土层剖面上,0—20cm 和 20—40cm 土层不同程度沙化草地的土壤沙粒、粉粒和粘粒含量变化明显,极重度沙化草地较未沙化草地土壤沙粒含量分别增加了 28.15% 和 14.39% ($P < 0.05$),粉粒和粘粒含量分别减少了 87.57% 和 82.96%、75.82% 和 65.73% ($P < 0.05$)。随着土层深度的增加,不同程度沙化草地土壤颗粒组成之间的差异性逐渐减小。

2.3 草地沙化过程中土壤全氮变化特征

草地沙化导致 0—100cm 土层全氮大量流失,极重度沙化阶段较未沙化阶段全氮含量下降幅度达 73.95%。随着沙化进程,全氮含量及降低幅度呈逐渐减少的变化特征,其中,轻度沙化阶段较未沙化草地、中度沙化阶段较轻度沙化阶段、重度沙化阶段较中度沙化阶段、极重度沙化阶段较重度沙化阶段分别下降了 41.18%、33.16%、21.37% 和 15.74%,方差分析结果表明,不同程度沙化草地之间土壤全氮含量差异达极显著水平 ($P < 0.01$) (表 3);在土层剖面上,0—20cm 土层全氮含量受草地沙化影响最为明显,其下降幅度达 86.43%,其中,轻度沙化阶段减少量最多,达 0.51g/kg,且随着沙化严重程度增加,全氮减少量呈现逐渐降低的变化特征。随着土层深度增加,草地沙化对土壤全氮的影响程度逐渐减弱,80—100cm 土层全氮含量下降幅度相对最低,为 49.04%。

2.4 草地沙化过程中土壤碱解氮变化特征

草地沙化导致 0—100cm 土层碱解氮含量下降了 7.72%。随着沙化进程,碱解氮含量呈逐渐减少的变化特征,其中,轻度沙化阶段较未沙化阶段、中度沙化阶段较轻度沙化阶段、重度沙化阶段较中度沙化阶段、极重度沙化阶段较重度沙化阶段分别降低了 35.17%、33.20%、24.88% 和 31.53% ($P < 0.01$) (表 4);在土层剖面上,0—20cm 土层土壤碱解氮含量减少最明显,下降的幅度达 83.52%。其中,轻度沙化阶段减少量最多,达 8.90 mg/kg。随着土层深度增加,碱解氮受草地沙化的影响程度逐渐减小,其中,80—100cm 土层仅下降了 49.91%。

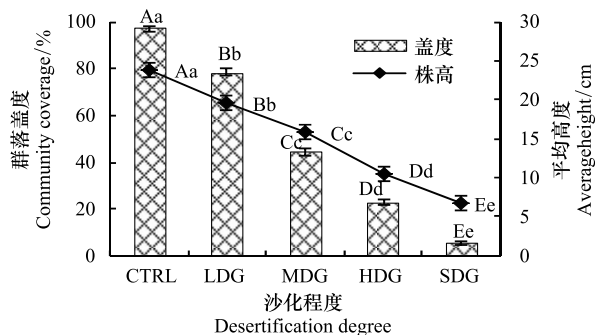


图 1 不同沙化程度植物群落外貌特征

Fig.1 Change of community physiognomy in different desertification grasslands

CTRL: 未沙化样地 Non-desertification grassland; LDG: 轻度沙化样地 Light-desertification grassland; MDG: 中度沙化样地 Medium-desertification grassland; HDG: 重度沙化草地 Heavy-desertification grassland; SDG: 严重沙化样地 Severe-desertification grassland; 不同小写字母代表处理间显著水平为 0.05, 不同大写字母代表处理间显著水平为 0.01, 相同字母代表处理之间者差异不显著

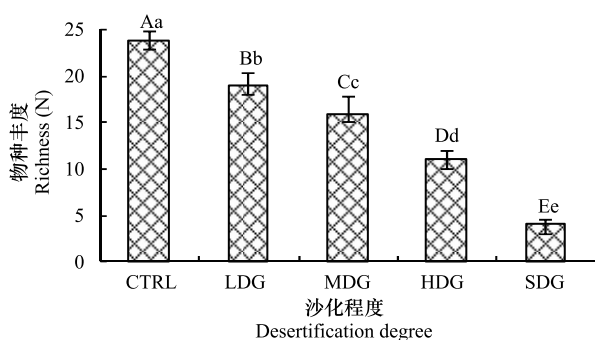


图 2 不同程度沙化草地物种丰富度变化情况

Fig.2 Change of species richness in different desertification grasslands

表 2 不同沙化程度草地土壤颗粒组成

Table 2 Changes in soil particle size distribution in 0—100 cm depth with increasing degrees of grassland desertification

土层深度/cm soil depth	未沙化 Non-desertification grassland	轻度沙化 Light-desertification grassland	中度沙化 Medium-desertification grassland	重度沙化 Heavy- desertification grassland	极重度沙化 Severe-desertification grassland
沙粒含量 Coarse sand (2—0.02mm, %)					
0—20	74.78±6.85Dd	85.80±5.72 Cc	90.20±2.62 Bb	93.49±4.75 Aa	95.83±2.37 A a
20—40	84.27±3.24 Bc	90.60±2.99 Ab	93.57±4.17 Aab	95.47±1.36 Aa	96.40±4.20 Aa
40—60	90.44±3.56 Ac	93.40±5.22 Ab	94.80±2.25 Aa	95.77±2.27 Aa	96.47±2.23 Aa
60—80	92.67±0.89 Ab	94.56±2.45 Aa	95.29±1.82 Aa	96.01±3.36 Aa	96.52±1.75 Aa
80—100	94.12±3.07 Aa	94.72±1.43 Aa	95.68±0.97Aa	96.36±1.63 Aa	96.81±2.58 Aa
均值 Average	87.26±3.52 Ab	91.82±3.56 Aab	93.91±2.37 Aa	95.42±2.67 Aa	96.41±2.63 Aa
粉粒含量 Silt (0.02—0.002mm, %)					
0—20	16.41±1.71Aa	8.66±0.81 Bb	5.10±1.95 Cc	3.04±0.60 Dd	2.04±0.40 Dd
20—40	10.39±0.88Aa	5.93±1.40 Bb	3.73±0.53 Bc	2.30±0.87 Bc	1.77±0.47 Cd
40—60	5.11±1.42 Aa	2.90±0.74 Ab	2.40±1.03 Ab	2.03±1.25 Abc	1.63±0.23 Ac
60—80	4.72±1.02 Aa	3.24±0.48 Aab	2.26±0.65 Ab	2.06±0.61Ab	1.60±0.21 Ab
80—100	3.46±0.36 Aa	2.83±0.42 Aa	2.28±0.73 Aa	1.86±0.87 Aa	1.62±0.43 Aa
均值 Average	8.02±1.08 Aa	4.71±0.77 Ab	3.15±0.98 Ab	2.26±0.84 Abc	1.73±0.35 Ac
粘粒含量 Clay (<0.002mm, %)					
0—20	8.81±1.32Aa	5.54±0.71 Bb	4.7±1.66 Bc	3.47±1.09 Cd	2.13±1.06 Cd
20—40	5.34±0.67Aa	3.47±0.61 Bb	2.70±1.20 Cbc	2.23±1.00 Cc	1.83±0.29 Cc
40—60	4.45±0.92 Aa	3.70±0.60 Ab	2.80±0.64 Ac	2.20±0.35 Acd	1.90±1.01 Ad
60—80	2.61±0.84 Aa	2.20±0.74 Aa	2.45±0.46 Aa	1.93±0.23Aab	1.88±0.29 Ab
80—100	2.42±0.27 Aa	2.45±0.37 Aa	2.04±0.13 Aa	1.78±0.46 Aa	1.57±0.18 Aa
均值 Average	4.72±0.76 Aa	3.47±0.61 Aa	2.94±0.82 Ab	2.32±0.63 Ab	1.86±0.57 Ab

不同小写字母代表处理间显著水平为 0.05,不同大写字母代表处理间显著水平为 0.01,相同字母代表处理之间者差异不显著

表 3 不同程度沙化草地土壤全氮含量(g/kg)

Table 3 Content of soil total nitrogen in different degree of desertification grasslands

土层深度/cm soil depth	未沙化 Non-desertification grassland	轻度沙化 Light-desertification grassland	中度沙化 Medium-desertification grassland	重度沙化 Heavy-desertification grassland	极重度沙化 Severe-desertification grassland
0—20	0.973±0.203Aa	0.463±0.101Bb	0.267±0.042Cc	0.177±0.051Dd	0.132±0.036Ee
20—40	0.476±0.092Aa	0.307±0.061Bb	0.207±0.047cC	0.153±0.009Dd	0.121±0.026Ee
40—60	0.357±0.068Aa	0.231±0.011Bb	0.165±0.073Cc	0.133±0.008Dd	0.117±0.004Dd
60—80	0.247±0.032Aa	0.176±0.017Bb	0.132±0.023Cc	0.124±0.010Cc	0.113±0.009Cc
80—100	0.208±0.046Aa	0.153±0.033Ab	0.118±0.004Bc	0.112±0.007Bc	0.106±0.003Bc
均值 Average	0.452 ±0.054Aa	0.266 ±0.037Bb	0.178 ±0.013Cc	0.140 ±0.021Dd	0.118 ±0.007De

表 4 不同程度沙化草地土壤碱解氮含量(mg/kg)

Table 4 Content of soil available nitrogen in different degree of desertification grasslands

土层深度/cm Soil depth	未沙化 Non-desertification grassland	轻度沙化 Light-desertification grassland	中度沙化 Medium-desertification grassland	重度沙化 Heavy- desertification grassland	极重度沙化 Severe-desertification grassland
0—20	43.76±1.43Aa	24.57±1.74Bb	16.57±0.32Cc	13.62±0.67Dd	7.21±0.22Ee
20—40	23.04±1.57Aa	16.14±0.98Bb	10.15±0.56Cc	6.28±0.44Dd	4.11±0.16Ee
40—60	10.45±0.78Aa	8.46±0.45Bb	5.93±0.86Cc	3.51±0.33Dd	3.13±0.52Dd
60—80	6.63±1.13Aa	4.67±0.89Bb	3.06±0.66BCc	2.81±0.47BCc	2.73±0.09Cc
80—100	5.41±0.43Aa	4.05±0.57Ab	2.96±0.13Bc	2.83±0.23Bc	2.71±0.17Bc
均值 Average	17.86 ±0.78Aa	11.58 ±0.46Bb	7.73 ±0.57Cc	5.81 ±0.33Dd	3.98 ±0.28Ee

2.5 草地沙化过程中土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 变化特征

草地沙化导致 0—100cm 土层 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量下降幅度达 76.75%, 其中, 轻度沙化阶段较未沙化阶段、中度沙化阶段较轻度沙化阶段、重度沙化阶段较中度沙化阶段、极重度沙化阶段较重度沙化阶段分别降低了 46.74%、27.95%、27.21% 和 16.79% ($P<0.01$) (表 5); 土层剖面上, 0—20cm 土层 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 受草地沙化影响最明显, 下降幅度达 82.11%。其中, 轻度沙化阶段减少数量最多, 达 4.27mg/kg, 其随着沙化严重程度增加, 其减少量呈现逐渐降低的变化特征。随着土层深度增加, 草地沙化对土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的影响程度逐渐降低。

表 5 不同程度沙化草地土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量 (mg/kg)

Table 5 Content of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in different degree of desertification grasslands

土层深度/cm soil depth	未沙化 Non-desertification grassland	轻度沙化 Light-desertification grassland	中度沙化 Medium-desertification grassland	重度沙化 Heavy- desertification grassland	极重度沙化 Severe-desertification grassland
0—20	9.39±0.89Aa	5.12±0.76Bb	3.02±0.43Cc	2.06±0.22Dd	1.68±0.07Ee
20—40	7.08±0.78Aa	3.63±0.54Bb	2.72±0.21Cc	1.63±0.07Dd	1.38±0.03Ee
40—60	3.85±1.04Aa	1.72±0.62Bb	1.66±0.32Bb	1.20±0.07Cc	0.92±0.05Dd
60—80	2.78±0.53Aa	1.62±0.57Bb	1.07±0.07Cc	1.05±0.11Cc	0.87±0.09Cd
80—100	1.42±0.32Aa	0.97±0.11Bb	0.94±0.13Bb	0.91±0.03Bb	0.85±0.06Bb
均值 Average	4.90±0.57Aa	2.61±0.63Bb	1.88 ±0.28Cc	1.37±0.13Dd	1.14±0.07De

2.6 草地沙化过程中土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 变化特征

草地沙化导致 0—100cm 土层 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量下降了 79.77%, 其中, 轻度沙化阶段较未沙化阶段、中度沙化阶段较轻度沙化阶段、重度沙化阶段较中度沙化阶段、极重度沙化阶段较重度沙化阶段分别降低了 43.46%、40.78%、25.98% 和 18.38% ($P<0.01$) (表 6); 在土层剖面上, 0—20cm 土层 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 下降幅度最明显, 下降幅度达 88.82%, 其中, 轻度沙化阶段减少数量最多, 达 7.30mg/kg, 且随着沙化严重程度增加, 其减少数量呈逐渐降低的变化特征。随着土层深度增加, 草地沙化对土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的影响程度逐渐降低。

表 6 不同程度沙化草地土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量 (mg/kg)

Table 6 Contents of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in different degree of desertification grasslands

土层深度/cm soil depth	未沙化 Non-desertification grassland	轻度沙化 Light-desertification grassland	中度沙化 Medium-desertification grassland	重度沙化 Heavy- desertification grassland	极重度沙化 Severe-desertification grassland
0—20	13.77±1.29Aa	6.47±1.04Bb	3.42±0.82Cc	2.30±0.12Dd	1.54±0.07Ee
20—40	7.48±1.05Aa	4.27±0.63Bb	2.12±0.51Cc	1.60±0.07Dd	1.43±0.03Ee
40—60	3.41±1.02Aa	2.56±0.72Bb	1.63±0.13Cc	1.24±0.11Dd	1.03±0.09De
60—80	2.52±0.91Aa	1.83±0.61Bb	1.32±0.17Cc	1.09±0.24Ccd	0.95±0.03Cd
80—100	1.79±0.41Aa	1.25±0.27Ab	1.21±0.09Bb	0.95±0.05Bc	0.91±0.07Bc
均值 Average	5.79±1.03Aa	3.28±0.47Bb	1.94±0.31Cc	1.44±0.13Dd	1.17±0.05De

2.7 草地沙化过程中土壤 MBN 变化特征

草地沙化导致 0—100cm 土层 MBN 含量下降了 84.12%, 其中, 轻度沙化阶段较未沙化阶段、中度沙化阶段较轻度沙化阶段、重度沙化阶段较中度沙化阶段、极重度沙化阶段较重度沙化阶段分别降低了 46.88%、44.22%、31.16% 和 22.14% ($P<0.01$) (表 7); 在土层剖面上, 0—20cm 土层 MBN 下降幅度最明显, 达 91.77%, 其中, 轻度沙化阶段减少数量最多, 达 9.46mg/kg, 随着沙化严重程度增加, MBN 减少量呈现逐渐降低的变化特征。随着土层深度增加, 草地沙化对土壤 MBN 的影响逐渐降低。

表 7 不同程度沙化草地土壤 MBN 含量 (mg/kg)

Table 7 Contents of microbialbiomassnitrogen in different degree of desertification grasslands

土层深度/cm soil depth	未沙化 Non-desertification grassland	轻度沙化 Light-desertification grassland	中度沙化 Medium-desertification grassland	重度沙化 Heavy-desertification grassland	极重度沙化 Severe-desertification grassland
0—20	18.71±0.85Aa	9.25±0.98Bb	4.18±0.13Cc	2.45±0.46Dd	1.54±0.31Ee
20—40	8.32±1.38Aa	3.51±0.64Bb	2.25±0.52Cc	1.69±0.09Dd	1.28±0.13De
40—60	4.15±0.67Aa	2.81±0.46Bb	1.78±0.23Cc	1.28±0.17Dd	1.08±0.05Dd
60—80	2.48±0.53Aa	1.79±0.41Bb	1.24±0.13Cc	0.92±0.08Cd	0.84±0.03Cd
80—100	1.54±0.27Aa	1.34±0.23Ab	0.98±0.07Bc	0.84±0.03Bc	0.85±0.02Bc
均值 Average	7.04±0.74Aa	3.74±0.48Bb	2.09±0.3Cc	1.44±0.27Dd	1.12±0.08De

2.8 沙化草地土壤氮素与土壤颗粒组成相关分析

相关分析结果表明,研究区土壤全氮、碱解氮、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 MBN 与土壤沙粒含量均呈极显著负相关特征 ($P<0.01$), 相关系数分别达 -0.987 、 -0.966 、 -0.980 、 -0.991 和 -0.981 , 与粘粒、粉粒含量均呈极显著正相关特征, 相关系数分别达 0.983 和 0.960 、 0.950 和 0.964 、 0.982 和 0.941 、 0.990 和 0.957 、 0.975 和 0.959 ($P<0.01$) (表 8); 说明草地沙化过程中, 土壤颗粒组成对全氮、碱解氮、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 MBN 具有显著影响。

表 8 相关性分析

Table 8 Correlation Analysis

项目 Item	全氮 Total nitrogen	碱解氮 Available nitrogen	铵态氮 $\text{NH}_4^+\text{-N}$	硝态氮 $\text{NO}_3^-\text{-N}$	微生物量氮 MBN
沙粒 Coarse sand	-0.987^{**}	-0.966^{**}	-0.980^{**}	-0.991^{**}	-0.981^{**}
粉粒 Silt	0.983^{**}	0.950^{**}	0.982^{**}	0.990^{**}	0.975^{**}
粘粒 Clay	0.960^{**}	0.964^{**}	0.941^{**}	0.957^{**}	0.959^{**}

* * 为极显著相关 ($P<0.01$) 相关性

2.9 草地沙化过程中土壤氮变素对地表群落盖度的响应特征

研究结果表明, 土壤全氮、碱解氮、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 MBN 含量均随地表植被群落盖度降低呈现出逐渐减少的变化特征, 但不同土层变化趋势程度存在差异, 其中, $0\text{—}20\text{cm}$ 土层折线变化趋势最陡, 降低幅度最大 (图 3)。随着土层深度增加, 地表植被群落盖度对土 $0\text{—}20\text{cm}$ 壤全氮、碱解氮、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 MBN 对的影响逐渐减弱, $20\text{—}40\text{ cm}$ 、 $40\text{—}60\text{ cm}$ 、 $60\text{—}80\text{ cm}$ 和 $80\text{—}100\text{ cm}$ 土层各氮素与群落盖度拟合折线趋于平缓, 降低幅度较小。相关分析表明, 地表群落盖度与土壤全氮、碱解氮、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 MBN 均呈极显著正相关, 相关系数分别达 0.930 、 0.982 、 0.914 、 0.932 和 0.928 。说明草地沙化过程中, 地表植被对土壤全氮、碱解氮、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 MBN 的含量具有显著影响, 且对 $0\text{—}20\text{cm}$ 土层土壤氮素影响尤为明显。

3 讨论

3.1 草地沙化对土壤氮素含量的影响

以风蚀为主要特征的土地沙化是我国最严重的草地退化类型之一^[31]。它能导致土壤氮素含量快速降低, 引起土壤生产潜力的部分或完全损失, 从而破坏草地生态系统氮素平衡^[32-33]。本研究结果表明, 随着沙化进程, 川西北高寒草原不同程度沙化草地 $0\text{—}100\text{cm}$ 土层土壤全氮、碱解氮含量呈显著降低的变化特征, 降低幅度分别达 73.95% 和 77.72% , 其中, 轻度沙化阶段变化最为明显, 降低幅度分别为 41.18% 和 35.17% 。表明沙化对研究区草地土壤氮素含量影响显著, 其中沙化前期阶段影响最为显著。 $0\text{—}20\text{cm}$ 土层全氮、碱解氮含量分别降低了 86.43% 和 83.52% , 而随着土层深度增加, 全氮、碱解氮含量降低幅度逐渐减小, 表明草地沙化对表层土壤氮素影响更为显著。上述结果与赵哈林等^[5, 34-35]、Zhou^[18] 和李侠等^[15] 关于我国干旱半干旱地

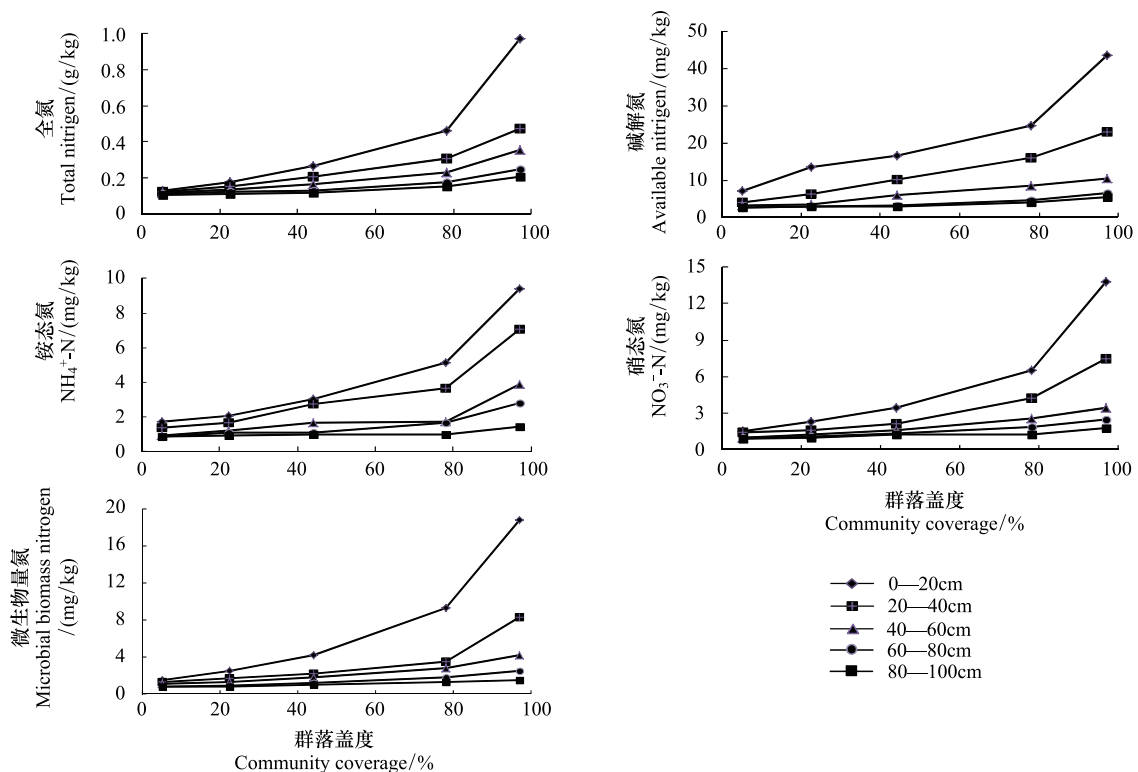


图3 群落盖度与土壤氮素相关分析

Fig.3 Correlation analysis between community coverage and nitrogens

区草地沙化进程中土壤氮素的变化规律相一致。说明川西北半湿润地区草地沙化过程中土壤全氮和碱解氮变化特征与我国北方半干旱地区草地相似。

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 等无机态氮是植物直接吸收利用的重要地下氮素宝库,对于植物生长具有至关重要的作用^[36-37]。掌握草地沙化过程中土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、MBN 的变化特征,对于掌握草地沙化过程中土壤肥力降低机制,培肥沙化草地,恢复地表植被具有关键性作用。本研究结果表明,不同程度沙化草地土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 MBN 含量差异均呈极显著水平 ($P<0.01$),但其差异随土层深度增加呈逐渐缩小的变化特征。随着草地沙化进程, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 MBN 含量逐渐减少,且呈现出草地沙化前期减少快,后期减少相对较慢的变化特征。在土层剖面上,表层 0—20cm 土层土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、MBN 对草地沙化的响应最明显,其含量分别降低了 82.11%、88.82% 和 91.77% ($P<0.01$)。随着土层深度增加, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、MBN 受草地沙化的影响逐渐减弱。这与全氮、碱解氮的变化特征相同。这是由于 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、MBN 是土壤氮素的重要组成部分,其含量高低与土壤全氮含量密切相关。

3.2 土壤氮素损失与草地沙化的关系

过度放牧、人类活动增强是研究区草地沙化的潜在威胁,而风蚀则导致研究区草地沙化的主要驱动因素,影响着地表特征和土壤生物潜力一个重要过程^[38-39]。以风蚀驱动的土地沙化能导致土壤细颗粒损失,使土壤质地变得更加沙质化^[31,40]。苏永中等^[41]和赵哈林等^[35]研究指出,与粘粉粒、极细沙结合的全氮含量远高于粗沙组分全氮含量。本研究相关分析表明,土壤全氮、碱解氮、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 MBN 与土壤粉粒和粘粒均呈极显著正相关关系 ($P<0.01$),草地沙化过程中,土壤粉粒和粘粒含量大幅减少,分别降低了 82.96% 和 65.73%。这表明研究区草地沙化过程中,风蚀选择性吹蚀粉粒和粘粒是引起土壤氮素损失的重要原因。这与 Spain 等^[42]结论一致。表层 0—20cm 土层土壤氮素损失最为明显,这与以风蚀为主要特征的土地沙化能够去除表层富含养分的土壤有关^[33,43]。因此,通过设置生态沙障或物理沙障等措施来降低风蚀对沙化草地的吹

蚀作用,对于研究区沙化草地的生态恢复和治理尤为关键。此外,研究区土壤氮素损失还与地表植被群落盖度密切相关,相关分析表明,土壤全氮、碱解氮、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 MBN 与群落盖度均呈现极显著正相关特征。随着沙化严重程度加剧,地表植被群落盖度逐渐降低,土壤全氮、碱解氮、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 MBN 含量均呈逐渐减少的变化趋势。这与 Zhou 等^[18]研究一致。这一方面是由于在以风蚀为驱动的沙化草地生态系统中,地表植被对土壤具有保护作用,能够降低土壤受风蚀的影响。另一方面,在无其它因素干扰下,地表植被群落盖度也高,进入土壤中的有机质就越多,其土壤氮素含量就越高^[44-46]。说明草地沙化过程中地表植被状况逐渐恶化也是导致土壤氮素损失的重要原因之一。因此,通过种植研究区沙化草地适生植物来提高沙化草地地表植被状况是提高沙化草地土壤氮素含量和治理沙化草地的有效途径。

4 结论

(1)草地沙化是川西北高寒草地最严重的生态环境问题之一,其导致 0—100cm 土层土壤氮素大量损失,极重度沙化阶段较未沙化阶段草地土壤全氮、碱解氮、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 MBN 分别减少了 73.95%、77.72%、76.75%、79.77%和 84.12%,其中,0—20cm 土层损失最明显,分别减少了 86.43%、83.52%、82.11%、88.82%和 91.77%。随着土层深度增加,沙化过程中土壤氮素降低数量逐渐减少。相关分析表明,全氮、碱解氮、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 MBN 与土壤粉粒、粘粒含量和植被群落盖度均呈极显著正相关关系,与土壤沙粒含量呈极显著负相关关系。

(2)草地沙化过程中,风蚀选择性吹蚀土壤粉粒、粘粒及地表植物盖度逐渐降低是导致土壤氮素损失的主要因素。不同沙化阶段,土壤氮素损失数量不尽相同,其中,轻度沙化阶段氮素损失最严重,全氮、碱解氮、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 MBN 含量分别降低了 41.18%、35.17%、46.74%、43.46%和 46.88%。这与我国半干旱地区草地沙化过程中土壤氮素损失特征相同。说明该区域治沙的关键一方面是要采取措施降低风蚀对地表土壤吹蚀作用,提高沙化草地地表植被覆盖。另一方面,还应及时对沙化前期阶段及潜在沙化的草地进行生态治理,从而避免草地沙化继续恶化。

参考文献 (References):

- [1] Gad A, Abdel-Samie A G. Study on desertification of irrigated arable lands in Egypt. II-Salinization. *Egyptian Journal of Soil Science*, 2000, 40 (3): 373-384.
- [2] 朱震达, 陈广庭. 中国土地沙质荒漠化. 北京: 科学出版社, 1994.
- [3] 赵哈林, 周瑞莲, 赵学勇, 张铜会. 科尔沁沙地沙漠化正、逆过程的地面判别方法. *中国沙漠*, 2008, 28(1): 8-15.
- [4] Gomes L, Arrúe J L, López M V, Sterk G, Richard D, Gracia R, Sabre M, Gaudichet A, Frangi J P. Wind erosion in a semiarid agricultural area of Spain: the WELSONS project. *CATENA*, 2003, 52(3/4): 235-256.
- [5] 赵哈林, 周瑞莲, 苏永中, 李玉强. 科尔沁沙地沙漠化过程中土壤有机碳和全氮含量变化. *生态学报*, 2008, 28(3): 976-982.
- [6] 阿穆拉, 赵萌莉, 韩国栋, 贾乐, 董亭. 放牧强度对荒漠草原地区土壤有机碳及全氮含量的影响. *中国草地学报*, 2011, 33(3): 115-118.
- [7] 乔有明, 王振群, 段中华. 青海湖北岸土地利用方式对土壤碳氮含量的影响. *草业学报*, 2009, 18(6): 105-112.
- [8] 吴建国, 韩梅, 裴伟, 艾丽, 常学向. 祁连山中部高寒草甸土壤氮矿化及其影响因素研究. *草业学报*, 2007, 16(6): 39-46.
- [9] 杨成德, 龙瑞军, 陈秀蓉, 徐长林, 王进明. 东祁连山不同高寒草地类型土壤表层碳、氮、磷密度特征. *中国草地学报*, 2008, 30(1): 1-5.
- [10] 张珂, 何明珠, 李新荣, 谭会娟, 高艳红, 李刚, 韩国君, 吴杨杨. 阿拉善荒漠典型植物叶片碳、氮、磷化学计量特征. *生态学报*, 2014, 34 (22): 6538-6547.
- [11] Zhao H L, Zhou R L, Zhang T H, Zhao X Y. Effects of desertification on soil and crop growth properties in Horqin sandy cropland of Inner Mongolia, North China. *Soil and Tillage Research*, 2006, 87(2): 175-185.
- [12] Al-Kaisi M M, Yin X H, Licht M A. Soil carbon and nitrogen changes as affected by tillage system and crop biomass in a corn-soybean rotation. *Applied Soil Ecology*, 2005, 30(3): 174-191.
- [13] Kelly R H, Burke I C, Lauenroth W K. Soil organic matter and nutrient availability responses to reduced plant inputs in shortgrass steppe. *Ecology*, 1996, 77(8): 2516-2527.
- [14] 毛思慧, 谢应忠, 许冬梅. 宁夏盐池县草地沙化对植被与土壤特征的影响. *水土保持通报*, 2014, 34(1): 34-39.

- [15] 李侠, 李潮, 蒋进平, 许冬梅. 盐池县不同沙化草地土壤特性. 草业科学, 2013, 30(11): 1704-1709.
- [16] 金云翔, 徐斌, 杨秀春, 李金亚, 马海龙, 高添, 于海达. 不同沙化程度草原地下生物量及其环境因素特征. 草业学报, 2013, 22(5): 44-51.
- [17] 杨梅焕, 朱志梅, 曹明明, 王春杰, 谢艳. 毛乌素沙地东南缘不同沙漠化阶段土壤-植被关系研究. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(5): 181-187.
- [18] Zhou R L, Li Y Q, Zhao H L, Drake S. Desertification effects on C and N content of sandy soils under grassland in Horqin, northern China. Geoderma, 2008, 145(3/4): 370-375.
- [19] 连杰, 赵学勇, 王少昆, 王新源, 岳祥飞, 韩娟娟, 云建英, 黄文达. 科尔沁沙地风蚀作用对土壤碳、氮分布的影响. 生态学杂志, 2013, 32(3): 529-535.
- [20] Jacobs A F G, Ronda R J, Holtslag A A M. Water vapour and carbon dioxide fluxes over bog vegetation. Agricultural and Forest Meteorology, 2003, 116(1/2): 103-112.
- [21] 雍国玮, 石承苍, 邱鹏飞. 川西北高原若尔盖草地沙化及湿地萎缩动态遥感监测. 山地学报, 2003, 21(6): 758-762.
- [22] 廖雅萍, 王军厚, 付蓉. 川西北阿坝地区沙化土地动态变化及驱动力分析. 水土保持研究, 2011, 18(3): 51-54.
- [23] 刘朔, 蔡凡隆, 杨建勇, 李长生, 杨开选. 川西北沙化治理现状及治理区划. 林业调查规划, 2011, 36(3): 122-126.
- [24] 王信建, 林琼, 戴晟懋. 四川西北部土地沙化情况考察. 林业资源管理, 2007, (6): 16-20, 28.
- [25] 万婷, 涂卫国, 席欢, 李裕冬, 唐学芳, 杨一川. 川西北不同程度沙化草地植被和土壤特征研究. 草地学报, 2013, 21(4): 650-657.
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [27] 杜森, 高祥照. 土壤分析技术规范 (第二版). 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [28] 梁兰英. 紫外分光光度法测定土壤中的硝态氮. 甘肃环境研究与监测, 2001, 14(2): 80-81.
- [29] 黄懿梅, 安韶山, 曲东, 李盟军. 两种测定土壤微生物量氮方法的比较初探. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 830-835.
- [30] 苏永中, 赵哈林. 科尔沁沙地农田沙漠化演变中土壤颗粒分形特征. 生态学报, 2004, 24(1): 71-74.
- [31] 苏永中, 赵哈林, 张铜会, 李玉霖. 科尔沁沙地旱作农田土壤退化的过程和特征. 水土保持学报, 2002, 16(1): 25-28.
- [32] Franzluebbers A J, Stuedemann J A, Schomberg H H, Wilkinson S R. Soil organic C and N pools under long-term pasture management in the Southern Piedmont USA. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(4): 469-478.
- [33] Portnov B A, Safriel U N. Combating desertification in the Negev: dryland agriculture vs. dryland urbanization. Journal of Arid Environments, 2004, 56(4): 659-680.
- [34] 赵哈林, 李玉强, 周瑞莲. 沙漠化对科尔沁沙质草地生态系统碳氮储量的影响. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2412-2417.
- [35] Zhao H L, He Y H, Zhou R L, Su Y Z, Li Y Q, Drake S. Effects of desertification on soil organic C and N content in sandy farmland and grassland of Inner Mongolia. CATENA, 2009, 77(3): 187-191.
- [36] 王忠华, 叶庆富, 舒庆尧, 崔海瑞, 夏英武, 周美园. 转基因植物根系分泌物对土壤微生态的影响. 应用生态学报, 2002, 13(3): 373-375.
- [37] 聂玲玲, 冯娟娟, 吕素莲, 江萍, 范鹏祥, 台方, 李银心. 真盐生植物盐角草对不同氮形态的响应. 生态学报, 2012, 32(18): 5703-5712.
- [38] Marticorena B, Bergametti G, Gillette D, Belnap J. Factors controlling threshold friction velocity in semiarid and arid areas of the United States. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984-2012), 1997, 102(D19): 23277-23287.
- [39] Zhao H L, Zhao X Y, Zhang T H, Zhou R L, Li S G, Ohkuro T, Drake S. Desertification processes of sandy rangeland due to over-grazing in semi-arid area, Inner Mongolia, China. Journal of Arid Environments, 2005, 99(62): 309-319.
- [40] Hennessy J T, Kies B, Gibbens R P, Tromble J M. Soil sorting by forty-five years of wind erosion on a southern New Mexico range. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(2): 391-394.
- [41] 苏永中, 赵哈林. 农田沙漠化过程中土壤有机碳和氮的衰减及其机理研究. 中国农业科学, 2003, 36(8): 928-934.
- [42] Spain A V. Influence of environmental conditions and some soil chemical properties on the carbon and nitrogen contents of some tropical Australian rainforest soils. Australian Journal of Soil Research (Australia), 1990, 28(6): 825-839.
- [43] Wezel A, Rajot J L, Herbrig C. Influence of shrubs on soil characteristics and their function in Sahelian agro-ecosystems in semi-arid Niger. Journal of arid Environments, 2000, 44(4): 383-398.
- [44] 牛赞, 刘贤德, 赵维俊, 赵学龙. 祁连山青海云杉 (*Picea crassifolia*) 林浅层土壤碳、氮含量特征及其相互关系. 中国沙漠, 2014, 34(2): 371-377.
- [45] 梁爱华, 韩新辉, 张扬, 王平平, 杨改河. 纸坊沟流域退化土壤碳氮关系对植被恢复的时空响应. 草地学报, 2013, 21(5): 842-849.
- [46] 董凯凯, 王惠, 杨丽原, 杨宝山, 解伏菊. 人工恢复黄河三角洲湿地土壤碳氮含量变化特征. 生态学报, 2011, 31(16): 4778-4782.