



生态学杂志

Chinese Journal of Ecology

ISSN 1000-4890, CN 21-1148/Q

《生态学杂志》网络首发论文

题目: 黄河上游高寒草地全氮含量分布特征及其影响因素
作者: 苟照君, 李英年, 刘峰贵, 陈锐杰
DOI: 10.13292/j.1000-4890.201909.021
收稿日期: 2019-01-04
网络首发日期: 2019-06-27
引用格式: 苟照君, 李英年, 刘峰贵, 陈锐杰. 黄河上游高寒草地全氮含量分布特征及其影响因素[J/OL]. 生态学杂志.
<https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.201909.021>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.13292/j.1000-4890.201909.021

黄河上游高寒草地全氮含量分布特征及其影响因素

苟照君¹ 李英年^{2*} 刘峰贵^{1*} 陈锐杰¹

(¹ 青海师范大学地理科学学院, 西宁 810008; ² 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001)

摘要 高寒草地是青藏高原独特的生态系统,其全氮含量分布特征对草地质量有着决定性的影响。基于样点监测数据,分析了黄河源区高寒草地全氮含量与地理环境因子的相关性,并利用地理探测器探讨了地理环境单因子及其复合因子对全氮空间异质性分布的影响。结果表明:(1)不同类型植被的土壤全氮含量存在明显的差异,表现出线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*)草甸>小嵩草(*K. pygmaea*)草甸>紫花针茅(*Stipa purpurea*)草原>西藏嵩草(*K. tibetica*)+薹草(*Carex cinerascens*)草甸>青海固沙草(*Orinus kokonorica*)草原>异针茅(*S. aliena*)草原>小嵩草(*K. pygmaea*)+矮嵩草(*K. humilis*)草甸,对应的土壤为草甸土、黑钙土、黑毡土、草毡土、栗钙土。(2)区域土壤全氮含量与海拔、坡度、坡向、地形起伏度和植被类型呈正相关,与年降水量、 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温、年平均气温、土壤类型呈显著负相关;其中海拔、坡度、年降水量贡献率最高,均为1, $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温、年均气温、地形起伏度、植被类型、土壤类型分别为0.72、0.74、0.59、0.88、0.17。(3)年均气温与土壤类型、地形起伏度、植被类型,地形起伏度与植被类型、土壤类型,植被类型与土壤类型相互间对土壤全氮含量的作用为非线性增强,而其余因子之间对全氮含量的作用为非线性减弱,说明土壤全氮含量的空间变异性是各环境因子共同作用的结果,揭示了土壤全氮含量空间异质性分布影响因子的多样性和复杂性。

关键词 黄河上游; 高寒草地; 全氮含量; 地理探测器

Distribution and influencing factors of total nitrogen in alpine grassland of Yellow River upper reaches

GOU Zhao-jun¹, LI Ying-nian^{2*}, LIU Feng-gui^{1*}, CHEN Rui-jie¹

(¹College of Geographic Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810008, China; ²Northwest Institute of plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China)

Abstract: The Tibetan Plateau is dictated by the alpine grassland whose total nitrogen distribution decides the grassland quality. Based on the data monitoring of the sample, the research analyzed the relation between total nitrogen amount and geographical environment, and employed the Geodetector to illustrate the influence of single or multiple geographical factors towards the total nitrogen distribution. The results were shown as below: (1) There were obvious differences of total nitrogen amount in divergent vegetation, that is, *Kobresia capillifolia* meadow>*K. pygmaea* meadow>*Stipa purpurea* steppe>*K. tibetica* and *Carex cinerascens* meadow>*Orinus kokonorica* Stepp>*S. aliena* steppe>*K. pygmaea* and *K. humilis* meadow, with their soils meadow soil, chernozem, dark felty soil, alpine meadow soil and chestnut soil respectively. (2) The regional total nitrogen amount in the soil was positively linked with altitude, slope, aspect, topography and vegetation, and was negatively related to annual rainfall, the accumulated temperature $\geq 0^{\circ}\text{C}$, the

国家重点研发计划项目(2016YFC0501802)、第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0600)、青海省科技基础条件平台项目(2018-ZJ-T09)和国家自然科学基金面上项目(41877547)资助。

*通讯作者 E-mail: lyni@nwipb.cas.cn; lfg_918@163.com

收稿日期: 2019-01-04 接受日期: 2019-06-05

annually average temperature and the soil type. Meanwhile, the altitude, slope and annually average rainfall function most with the coefficient 1, while the accumulated temperature $\geq 0^{\circ}\text{C}$, the annually average temperature, slope, vegetation and soil type work with the coefficient 0.72, 0.74, 0.59, 0.88 and 0.17 respectively. (3) The relation between annually average temperature, soil type and topography, the linkage between topography, vegetation and soil type, as well as the correlation between vegetation and soil type had the non-linear increasing implication upon the total nitrogen amount. Meanwhile, other factors had the non-linear decreasing implication upon the total nitrogen content. From above we conclude that the distributions of total nitrogen content are defined by all environment factors of variety and complexity.

Key words: Yellow River upper reaches; alpine grassland; total nitrogen amount; Geodetector.

青藏高原特殊的气候条件孕育了独特的高寒草地生态系统 (Xu *et al.*, 2005), 是全球高寒草地面积最大、类型最多的区域。区域内生态系统脆弱, 对气候变化反应敏感 (孙鸿烈等, 2012)。高寒草地是青藏高原的重要屏障, 对许多生态服务功能如水源涵养、气候调节、生物多样性维持和基因库等都有重要影响, 也是支撑当地畜牧业发展的物质基础 (Pau *et al.*, 2011)。土壤是草地生态系统的核心组成部分, 是草地生命活动进行的主要场所和营养转化的重要枢纽。土壤养分状况是土壤物理、化学、生物等因素耦合的结果, 为植物的生长提供营养元素, 并有效地调节植物的功能属性 (邹丽娜等, 2009)。氮是草地生态系统的主要限制资源, 与植物的光合作用和细胞分裂密切相关, 对草地系统的组成、生产力和生态功能起着决定性的作用 (Singer *et al.*, 2003; 韩文轩等, 2009; 王合云等, 2015)。

土壤全氮含量的空间异质性是土壤环境与外部环境波动相互作用的结果, 主要受地形因素 (海拔、坡度等)、气候因素 (温度、降水)、植被状况及土壤环境等因素的影响。土壤温度的增加可以促进矿化, 提高植物对氮素的吸收和利用 (Ineson *et al.*, 2010), 研究表明, 一定的温度范围内 ($-4\sim 40^{\circ}\text{C}$), 土壤氮素的矿化率与温度呈正相关 (Stanford *et al.*, 1972)。土壤净氮矿化度与土壤含水量呈显著正相关 (Leiros *et al.*, 1999), 土壤含水量的减少, 降低了 15% 的矿化率。土壤全氮含量随海拔变化呈先升后降的趋势 (宋贤冲等, 2017)。坡度和坡向也是影响土壤氮素空间异质性的的重要因素。坡度越陡, 下坡水蚀土养分富集越明显, 土壤氮素含量越高 (肖胜生等, 2011)。草地类型也是影响氮素空间分布的重要因素, 主要表现为林地>荒草地>高寒草甸>高山草原>草地>灌丛草地 (张亚亚, 2017)。由于成土母质、地形和气候等因素的综合影响, 不同土壤类型全氮含量也有显著差异。目前对土壤全氮含量影响的研究主要聚焦于单因子对其的影响, 缺乏多个地理环境因子交互作用的影响研究。为此, 本文运用地理探测器对海拔、坡度、地形起伏度、降水、温度、日均气温稳定通过 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温 (以下简称 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温)、植被类型及土壤类型等诸因子对土壤全氮含量贡献的基础上, 探讨了复合因子对土壤全氮含量的作用和影响。为合理利用高寒草地和改善生态环境提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本研究选择黄河上游青海东南部地貌和草地群落差异显著的贵南、泽库、河南三县境内进行 (图 1), 区域海拔为 2191~4987 m, 年均气温为 $-2.2\sim 1.0^{\circ}\text{C}$, 年降水量约 400~600 mm, 降水主要集中在植物生长期的 5—9 月, 属于典型的高原大陆性气候。该区域地貌主要以山地和河流冲积平原为主, 相对高度变化在 2000 m 左右, 植被在垂直和水平方向上存在明显的差异, 有 4 种不同建群种的高寒草甸类型、3 种以上不同建群种的草原和 5 种以上的土壤类型, 是研究不同类型草地生态系统土壤全氮较为理想的区域。其地理位置、环境要素和植被群落状况见图 1、表 1 和表 2。

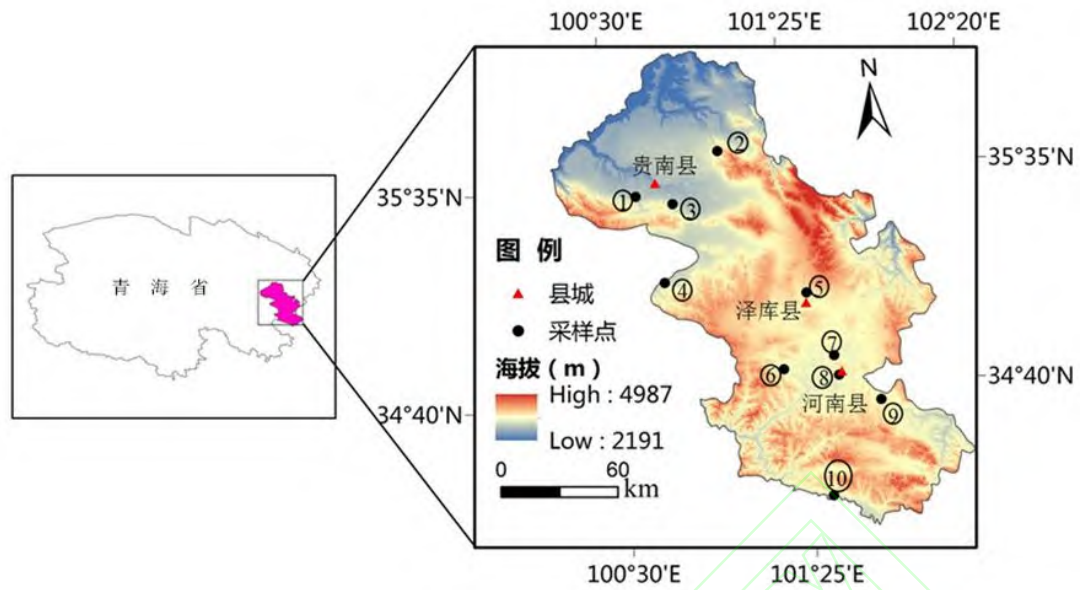


图 1 采样点分布示意图

Fig. 1 Distribution of sampling points

表 1 各采样点地理环境因子概况

Table 1 Geographical environmental factors at sampling points

序	采样点	草地类型	土壤 类型	海拔 (m)	坡度 (°)	$\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积 温 ($^{\circ}\text{C d}$)	年降水量 (mm)	年均气温 ($^{\circ}\text{C}$)	地形起 伏度 (m)
1	作毛村	西藏嵩草+藁草草甸	草甸土	3561	1.42	809.3	542.0	-0.6	4
2	东格日村	小嵩草草甸	黑毡土	3688	4.88	638.0	507.4	-1.5	16
3	尖克	异针茅草原	草甸土	3418	0.92	1265.2	631.0	0.3	4
4	荷日恒村	线叶嵩草草甸	草甸土	3520	3.87	1066.3	582.1	-0.6	2
5	阿木乎村	小嵩草草甸	黑毡土	3573	1.17	1017.3	573.0	-0.6	4
6	嘉仓村	青海固沙草草原	黑毡土	3419	2.52	1405.8	424.7	2.0	19
7	拉格日村	紫花针茅草原	黑钙土	3384	3.07	1216.2	460.0	0.5	4
8	过马营镇	小嵩草+矮嵩草草甸	黑毡土	3497	1.04	1353.8	389.5	2.9	4
9	兰龙村	西藏嵩草+藁草草甸	草毡土	3650	8.16	671.6	578.3	-0.3	20
10	黑羊场	青海固沙草草原	栗钙土	3299	1.85	1512.8	423.0	2.0	9

表 2 各采样点植物群落特征

Table 2 Community characteristics at each sampling point

编号	采样点	草地概况
1	作毛村	植被盖度 90%，优势种为矮嵩草、伴生中有垂穗披碱草(<i>Elymus nutans</i>)、山地早熟禾(<i>Poa orinosa</i>)、甘肃马先蒿(<i>Pedicularis kansuensis</i>)等
2	东格日村	植被生长茂密，植被盖度达 91%，优势种为小嵩草、伴生种有矮嵩草、甘肃棘豆(<i>Oxytropis kansuensis</i>)、异针茅、山地早熟禾、垂穗披碱草等
3	尖克	植被盖度 88%，优势种为小嵩草、矮嵩草、伴生种有天蓝苜蓿(<i>Medicago lupulina</i>)、紫花地丁(<i>Viola yedoensis</i>)等
4	荷日恒村	盖度 85%，优势种为小嵩草，伴生种有垂穗披碱草、异针茅、蒲公英(<i>Taraxacum dissolctum</i>)等
5	阿木乎村	出现退化现象，轻度退化草地的盖度为 82%，优势种为小嵩草、伴生中有山地早熟禾、垂穗披碱草等；重度退化草地的盖度为 50%，优势种为矮火绒草(<i>Leontopodium nanum</i>)、伴生种有鹅绒委陵菜(<i>Potentilla anserina</i>)、黄帚橐吾(<i>Ligularia virgaurea</i>)、二叶獐牙菜(<i>Swertia bifolia</i>)等

6	嘉仓村	植被盖度 88%，优势种为小嵩草、矮嵩草、伴生种有天蓝苜蓿、紫花地丁等
7	拉格日村	出现草地退化现象但是没有表现出不同退化梯度，植被盖度 60%，优势种为麻花苳（ <i>Gentiana straminea</i> ）、黄帚橐吾等，伴生种有山地早熟禾、矮火绒草、异针茅等
8	过马营镇	盖度为 80%，优势种为冰草（ <i>Agropyron cristatum</i> ），伴生中有长果婆婆纳（ <i>Veronica ciliate</i> ）、丛生黄芪（ <i>Astragalus confertus</i> ）、垂穗披碱草、鹅绒委陵菜等
9	兰龙村	出现不同程度的退化现象，轻度退化草地的盖度为 78%，优势种为矮嵩草、伴生中有小嵩草、异针茅、二裂委陵菜（ <i>Potentilla bifurca</i> ）等；重度退化草地的盖度为 55%，优势种为矮火绒草、伴生种有甘肃棘豆、柔软紫菀（ <i>Aster flaccidus</i> ）等
10	黑羊场	盖度 80%，优势种有小嵩草、矮嵩草、伴生种有山地早熟禾、冰草、异针茅等

1.2 研究材料与方法

1.2.1 样品采集 2015 年，青海省《三江源智慧生态畜牧业技术平台研发与应用示范》重大专项项目在贵南、河南、泽库 3 个行政县 10 个自然村（图 1）实施，开展了土壤环境和养分的调查。土壤样本于 2015 年 7 月下旬采集，首先在每个村附近的自然放牧地确定 1 号采样点，以该点为中心点，沿山体走向分别在上下 1 km 处选取 2 号样点和 3 号样点。再在 3 个样点设置 15 m 长的等边三角形，每个等边三角形的角点布局 1 m×1 m 的样方进行植物群落调查；然后在样方内挖取剖面，用内径 5 cm 环刀收集 0~10、10~20 cm 的土壤样品，环刀取出后迅速封盖，密封在自封袋中；同时收集 0~20 cm 的土壤一份，每份土壤样品采样量约 300~500 g，即每个村 3 个取样点 9 个重复。将土壤样品带回实验室进行相关分析，土壤全氮样品过 0.25 mm（60 目）土壤筛后用凯式定氮法测定土壤全氮（李宇庆等, 2006）。

1.2.2 地理信息数据 来自地理空间数据云(www.gscloud.cn)的 30 m DEM 并派生出坡度、海拔、地形起伏度数据（以上数据在现地进行了测量和验证）； ≥ 0 °C 积温、年均降水量、年均气温数据来源于中国基础地理数据库（表 1）。由于研究区海拔高，气温低，大部分村镇日均气温 ≥ 10 °C 天数小于 10 d，故未考虑 ≥ 10 °C 积温。

1.2.3 地理探测器模型及方法 王劲峰等（2017）开发的地理探测器模型是探测空间分异性并揭示其驱动力的模型，能够客观反映地理要素对自然综合体的影响力、度量空间异质性。

目前已广泛应用于土地利用（陈昌玲等, 2016; 李涛等, 2016）、灾害地理（Lou *et al.*, 2016）、区域规划（杨忍等, 2015; 杨忍等, 2016）、生态环境（廖颖等, 2016; Zhang *et al.*, 2016）等诸多领域，并取得了良好的效果。地理探测器模型包括风险探测、因子探测、生态探测和交互探测。本研究主要采用其中的因子探测和交互探测。

本文考虑到全氮含量的空间分异性与地理探测器模型表征的空间异质性功能相一致；其次地理探测器能够探测两个环境因子的交互变量，能够判断两个环境因子间是否存在交互作用，能够更好地解释各环境因子间相互作用对土壤全氮的贡献及影响。全氮的空间异质性是地形、气候、土壤、植被等因素共同作用的结果（白永飞等, 2002），研究区域内地形复杂，环境异质性明显，受环境因素的影响区域内土壤要素在空间上呈现出复杂的镶嵌性。因此，选取了海拔、坡度、年降水量、年均气温、 ≥ 0 °C 积温、地形起伏度、植被类型及土壤类型 8 个因子。并利用地理探测器分析了各环境因子对高寒草地全氮含量变化的影响，其计算式有（王劲峰等, 2017）：

$$P_{D,H} = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2}$$

式中， $P_{D,H}$ 是地理环境因子 D 对土壤全氮含量 H 的解释力， N 、 σ^2 分别为样本量和方差， N_h 、 σ_h^2 为 h （ $h=1, 2, \dots, L$ ）采样点土壤全氮含量和方差。 $P_{D,H}$ 值越大说明 D 因素对土壤全氮含量的影响越大。 $P_{D,H}$ 的取值范围为[0,1]，数值越大说明分类因子对采样点土壤全氮含量的解释力越大，数值为 0 说明分类因子与土壤全氮完全无关，数值为 1 说明分类因子能够完全解释土壤全氮含量空间分布的差异。

交互探测主要分析环境因子与全氮含量的空间分布是否存在交互作用。若 $P(x \cap y) < \min[P(x), P(y)]$ ，即影响因子 x 、 y 交互后呈非线性减弱趋势；若 $\min[P(x), P(y)] < P(x \cap y) < \max[P(x), P(y)]$ ，表明因子 x 、 y 交互单线性减弱；若 $P(x \cap y) > \max[P(x), P(y)]$ ，说明因子 x 、 y 交互后双因子增强；若 $P(x \cap y) > P(x) + P(y)$ ，说明因子 x 、 y 交互后非线性增强；如果 $P(x \cap y) = P(x) + P(y)$ ，则因子 x 、 y 独立互不影响。

2 结果与分析

2.1 高寒草地全氮含量分布特征

分析发现，贵南、河南、泽库 3 县 10 个村的自然放牧草地土壤全氮含量存在很大的差异(图 2)。土壤全氮含量最大值和最小值出现在荷日恒村和过马营镇，分别为 5.14、1.86 g·kg⁻¹。主要是由于研究区地形复杂、海拔高、气温低、降雨空间分布不均匀、土壤生境差别大(表 1)，影响植被群落组成(表 2)，间接改变输入土壤中的氮源，导致土壤全氮含量空间上分布不均。

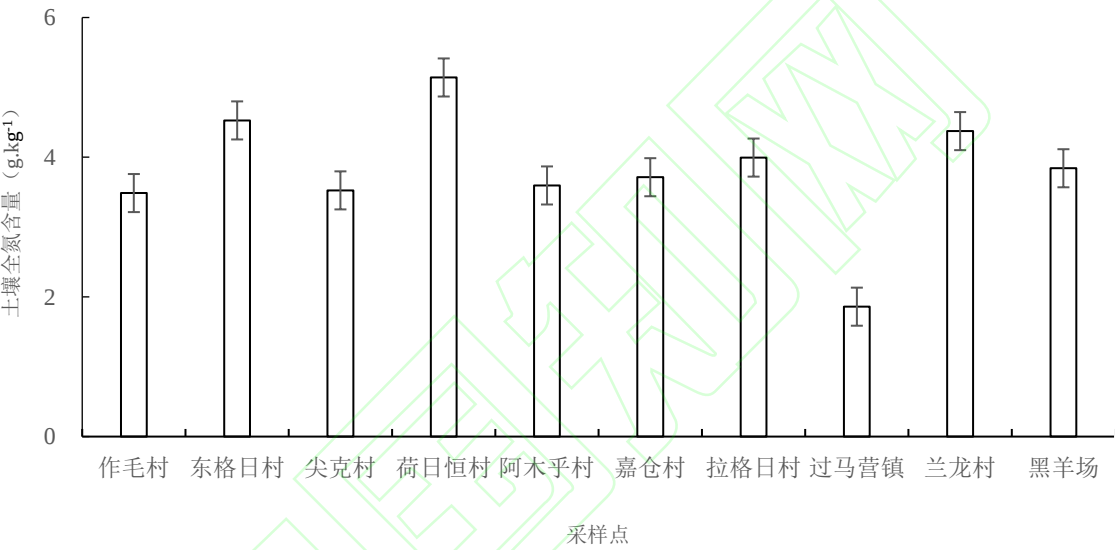


图 2 各采样点全氮含量

Fig. 2 Total nitrogen content at each sampling point

2.2 环境因素对高寒草地土壤全氮的影响

2.2.1 环境因素单因子影响及贡献率 分析研究区土壤全氮含量与海拔、坡度、地形起伏度、降水、年均气温、 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温、植被类型及土壤类型相关性表明，土壤全氮含量与海拔（图 3a）、坡度（图 3b）、地形起伏度（图 3f）、植被类型（图 3g）呈正相关，而与 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温（图 3c）、降水量（图 3d）、年均气温（图 3e）、土壤类型（图 3h）呈负相关，但均未达显著性检验水平（ $P>0.05$ ）。

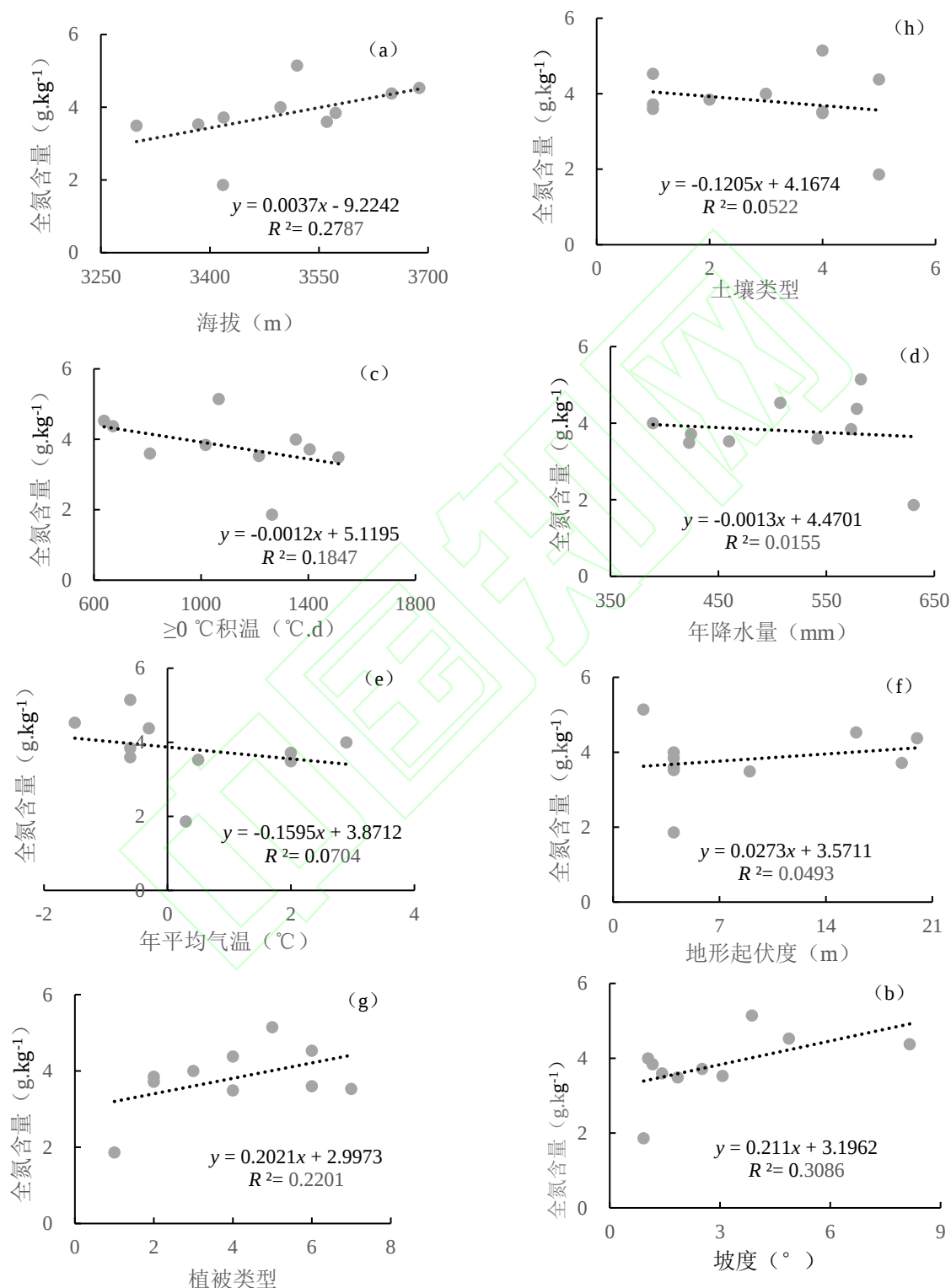


图 3 高寒草地全氮含量与地理环境因素的相关性

Fig. 3 Correlation between organic matter content and geographic environmental factors in alpine grassland

植被类型 1~7 分别代表：小嵩草+矮嵩草草甸，青海固沙草草原，紫花针茅草原，西藏嵩草+藁草草甸，线叶嵩草草甸，小嵩草草甸，异针茅草原；土壤类型 1~5 分别代表：黑毡土、栗钙土、黑钙土、草甸土、草毡土。

运用地理探测器模型计算单因子对土壤全氮含量贡献率表明（表 3），海拔、坡度、 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温、年均降水量贡献率最高，均为 1，对全氮的空间分布影响中占主导地位，并具有最强一致性，能够完全解释土壤全氮含量的空间异质性分布状况；年均气温、地形起伏度、植被类型、土壤类型分别为 0.74、0.59、0.88、0.17，是解释土壤全氮含量的空间异质性分布状况的次要因素。

表 3 环境单因子贡献率

Table 3 Environmental single factor contribution rate

环境因子	海拔	坡度	$\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温	年降水量	年均气温	地形起伏度	植被类型	土壤类型
贡献率	1.00	1.00	1.00	1.00	0.74	0.59	0.88	0.17

2.2.2 地理环境因子复合贡献分析 利用地理探测器模型中的交互探测分析环境因子对全氮含量空间分布的影响是否存在交互作用。探测结果显示年均气温与土壤类型、地形起伏度、植被类型，地形起伏度与植被类型、土壤类型，植被类型与土壤类型相互间对土壤全氮含量的作用为非线性增强，而其余因子之间对全氮含量的作用为非线性减弱（表 4）。

表 4 环境因子（PD 值）对全氮影响的交互作用

Table 4 Interaction of environmental factors (PD values) on total nitrogen

环境因子	海拔	坡度	$\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温	年降水量	年均气温	地形起伏度	植被类型	土壤类型
海拔	1.00							
坡度	1.00	1.00						
$\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温	1.00	1.00	1.00					
年降水量	1.00	1.00	1.00	1.00				
年均气温	1.00	1.00	1.00	1.00	0.74			
地形起伏度	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.59		
植被类型	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.88	
土壤类型	1.00	1.00	1.00	1.00	0.80	0.78	0.94	0.17

3 讨 论

本研究表明，年均气温与土壤类型、地形起伏度、植被类型，地形起伏度与植被类型、土壤类型，植被类型与土壤类型相互间对土壤全氮含量的作用为非线性增强，而其余因子之间对全氮含量的作用为非线性减弱，说明土壤全氮含量的空间变异性是各环境因子共同作用的结果。由于山地气候和生物垂直地带性特征，不同地带成土作用组合明显不同，从而形成了不同的土壤类型。一般来说，生态系统中较高的土壤氮素有利于植物生长，优势种的高度、盖度和丰富度增加，过量的养分将加剧种间竞争，加快优势种的生长速率，草本层郁闭，降低植物间的透光率，减弱存活率，使物种多样性、优势度和均匀度指数降低，进而影响到土壤养分(崔倩等, 2018)。气候条件制约着植被类型和植被生产力, 决定了土壤氮素的输入量, 并依土壤温湿度变化影响着矿质养分的释放和矿化。植被通过控制土壤养分输入直接调节生态系统, 并因土壤、地貌、生物地球化学、区域气候和其他有机物活动的差异性而受到限制或促进作用(朱志诚, 1994; 周慧珍等, 1996)。地形因子和土壤生境影响着植被的分布格局, 而植物群落又影响着土壤的物理、化学性质(刘世梁等, 2015)。

3.1 地形因子与海拔对土壤全氮含量的影响

地形通过影响光辐射、温湿度及土壤养分等的分布格局，从多维、多尺度影响土壤生态系统的物质循环过程和强度(李林海等, 2013)，是引起植物群落生产力、物种组成变化和土

壤氮素空间异质性变化的主导因子。研究区位于高寒气候区,长期气候寒冷、生长季短等环境因素限制了土壤氮素的矿化,为土壤氮素的积累提供了良好条件。但由于海拔、坡度地形起伏度(表1)的影响,土壤全氮含量空间分布的异质性尤为突出。

海拔是影响区域内光照、温度、水分、植物群落分布多样性,乃至植物的繁殖、生存、物质代谢和形态结构的生物和非生物因素的综合生态因子。本研究显示,区域内土壤全氮含量与海拔呈正相关,且海拔对土壤全氮含量的贡献率为1,说明海拔能够完全解释该地土壤全氮含量的空间异质性。造成以上现象可能的原因是,相同植被类型在高海拔的分布比低海拔区域更广泛(李迪强等,2002),且由于高海拔区的“热岛效应”的影响(刘秉儒等,2013),高海拔区植物根系密集,植被凋落物丰富,有机质含量高,为微生物的生理代谢活动提供了充足的能量,而低海拔区域温度相对较低,家畜粪便携带的肠道微生物在高温下大量分解,代谢速率加快,加速了矿质养分的分解。最终导致不同草地初始的微环境和土壤微生物发生改变,土壤氮素随海拔的变化呈现出梯度效应(潘红丽等,2009)。研究区内地势复杂,地形起伏度对土壤全氮含量的贡献率为0.59,说明地形起伏度也是影响土壤全氮含量的重要因素,地形起伏度越大,土壤侵蚀越强烈,不利于氮的积累。

坡度是土壤水分和养分水平流动的驱动力,对草地土壤系统有重要影响。陡坡地区不利于降雨入渗,但良好的排水条件有利于径流产生;在陡坡地区,植被稀疏,覆盖度低,吸收和保持土壤水分的能力减弱;土壤水分沿着坡面向下移动,下坡位置平缓,土壤水分的侧向运动减弱,并在下坡长期积累,影响到区域内氮素积累的过程和储量(张兴昌等,2000)。本研究结果则相反,区域内土壤全氮含量随坡度的增加而增加,且坡度对土壤全氮含量的贡献率为1,说明坡度能够完全解释该地区土壤全氮含量的空间异质性。造成这种现象可能的原因是,坡度大的区域人为扰动程度及牲畜可达程度低,为氮素的积累提供了良好的条件。坡度越大,风对土壤表面的冲击力越大,同时增加了土壤颗粒沿坡面下移的分力,直接影响坡面土壤风蚀量和土壤养分(余冬立等,2010)。坡度越大种子从母体掉落后的扩散范围和距离越大,形成不同的种子库(Jones *et al.*, 2010),进而影响到土壤氮素的积累。

3.2 气候条件对土壤全氮含量的影响

研究区气候因子差异较大(表1),气候因子(降水、温度和 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温)主要通过控制氮素的输入和输出影响土壤养分状况,并影响到土壤全氮的储量。由于气候条件的区域异质性,植被分布差异尤为显著(表2),这使得土壤承接的凋落物不同,土壤氮素的积累也有很大差异。

水是土壤环境中物质运输的载体,土壤水分的时空异质性和动态变化是土壤肥力的关键因素。降水和融雪是干旱、半干旱草地生态系统土壤水分的重要输入变量,影响和控制着草地植被的生长和生产,土壤蒸发、植被蒸腾和深向侧漏是土壤水分的输出变量,导致土壤水分随土壤深度的异质性。土壤全氮含量的空间分布主要受植被生长、水文能量转化过程和土壤养分迁移转化的影响。研究区域内土壤全氮含量随降水量的增加而减少,且降水量对土壤全氮含量的贡献率为1,即降水能够完全解释土壤全氮含量的空间异质性。区域内降水量的增加会增强表层土壤水分的空间依存度,刺激土壤微生物活性,提高寒草甸生态系统植物生长能力和基质的可利用性,提高硝化速率,增强地上植被对土壤养分的利用,为土壤中氮的输入创造了良好的条件(王瑞等,2018)。强降水情况下,土壤紧实度等物理性质的改变,会削弱 CO_2 在土壤中的运移速率或抑制土壤呼吸。相关研究显示,当土壤含水量为田间持水量的40%~80%时,土壤微生物活性最强,土壤呼吸通量最大(Caldwell *et al.*, 2008);当土壤含水量超过一定限度时,有氧呼吸受到抑制,土壤呼吸减弱;当土壤饱和时,土壤呼吸停滞。干旱引起的水分胁迫会导致土壤微生物数量和活性下降,影响植物器官的生长、减少面积和叶绿素含量,导致光合产物和一系列生理代谢功能的降低,促使植物快速成熟,进而降低地上部植被中的氮浓度(云建英等,2006)。降雨侵蚀引起的径流是土壤颗粒和养分流失的

主要驱动力,降雨初期,土壤养分的流失趋于缓和,随着降雨历时的增加和径流的加速,土壤养分在表面或矿物表面的侵蚀加剧,从而带走了土壤养分,但当土壤表层养分含量有限时,水体中全氮浓度会随着径流速度的增加而逐渐稀释(李国荣等,2018)。

温度主要是通过控制土壤呼吸、植物根系生长、土壤动物活动、土壤微生物活性以及土壤养分的分解速率,间接影响土壤中全氮含量。区域内年均气温与土壤全氮含量呈正相关关系,年均气温对土壤全氮含量的贡献率为 0.74,说明年均气温影响研究区域土壤全氮含量的重要因素并能够较好的解释土壤全氮含量的空间异质性。增温会影响植物的光合速率和微生物活性,在一定程度上促进植物吸收 N_2O (耿晓东等,2017),增加碳输入,促进氮沉降和氮矿化。高寒草地生态系统是由冻融作用塑造的高寒冻土土壤及协同进化的植被群落构成,增温后,冻土的解冻时间提前,冻土活动增厚改变原有的水力条件,导致不同功能群落植物对增温的非对称响应,改变了原有的植物群落格局(王根绪等,2006)。相关研究显示,增温条件下,高寒草地群落各物候期的初始期提前,末期推迟,花蕾期的初始期、末期均延迟、花期的时期延迟、末期提前,植物种群生长期平均延长 4.95 d(周华坤等,2000),区域内土壤全氮的含量也会受到影响。物候被认为是气候变暖的“指纹”,对温度变化非常敏感,区域内土壤全氮含量随着 0°C 积温的增加而减少, 0°C 积温对土壤全氮含量的贡献率为 1,即 0°C 积温能够完全解释区域内土壤全氮含量的空间异质性,主要通过减少土壤含水量抑制植物生长或增加植物呼吸对土壤养分的消耗来降低生物量,还可以通过增强植物的光合作用和对土壤养分的吸收来促进有机物产生。

3.3 植被状况对土壤全氮含量的影响

植物群落组成、生产力和凋落物通过改变土壤氮源,间接影响土壤全氮含量。本研究结果表明,不同类型植被土壤全氮含量存在很大的差异,且植被类型对土壤全氮含量的贡献率为 0.88,说明植被类型能够较好的解释该地区土壤全氮含量的空间异质性。不同类型草地与氮素循环相关的生理类群不同,不同物种或表型对外部变化的反应不同,它们之间的异步性缓冲了环境因子波动对草地群落的影响,同时由于种间相互作用群落生产力增加“超产效应”。由均衡统计引起的“投资组合效应”对群落稳定也有贡献。物种的组成和多样性是由各种环境因素共同作用的结果,植被格局可以控制局地气候和土壤生境,同时也是影响相邻斑块中植被因子间相互作用的重要因素,植被格局影响着土壤养分过程。不同植被类型枯落的质量和数量受植被种类、海拔、坡度等环境因素的影响(郭继勋等,1994),凋落物数量和质量与土壤微生物类型的耦合作用影响土壤呼吸和矿化,从而影响土壤全氮储量(李张敏等,2018;杜满义等,2018)。另外,凋落物覆盖可以保护土壤免受雨滴击打,减少蒸发,截留和过滤地表径流(张建文等,2017),有效改善土壤生境,使草地生态系统氮循环可持续。根系是吸收和储存养分的重要器官,不同植物及其根系占据不同的生态位空间,地下生物量的数量和分布通过控制分泌物和根系脱落形式来影响矿质养分输入土壤的数量和质量。不同植物体的化学特性是历经长期演化形成的,与生物进化显著相关,生物根据自身需求从环境中汲取所需元素,并通过消耗和释放与环境含量有差别的元素来响应环境。因此,区域内全氮含量的空间分布也会受到影响。

3.4 高寒草地植被对土壤养分的有效利用

土壤氮素和有机质存在一定的耦合效应,土壤氮素含量的变化改变了土壤对 CO_2 的吸收能力,影响到土壤碳的固定,土壤有机质含量对氮的矿化、固氮及反硝化有重要意义。土壤有机质的积累和释放过程对氮在土壤中的存储和转化起着主导作用。当土壤有机质 C/N 值大于 30:1 时,有机矿化处于初始阶段,不能为植物提供氮,氮能固定土壤中的有效氮,导致植物体内氮素缺乏,净氮矿化增加,全氮分解加速;当土壤有机质 C/N 小于 15:1 时,矿化初期可提供足够的有效氮,植物从有机质矿化过程中获得有效氮供应的可能性增加,外源有机质的增加可有效提高土壤中可溶性有机碳氮的浓度,为微生物提供充足的有效碳源,

促进土壤微生物数量和活性的增加，增加 CO_2 在土壤中的释放（王常慧等, 2004）。土壤植物组织中的 C/N 值决定了凋落物的分解速率和进入土壤的凋落物数量。低 C/N 有利于土壤有机质分解过程微生物对养分的释放和有效氮的增加，土壤 C/N 值的增加不利于土壤微生物对有机质分解过程中养分的释放，导致氮素限制和抑制微生物呼吸（刘伟等, 2012）。受高海拔、低温和缺氧气候条件的影响，研究区土壤氮素含量较高，加剧了植物对土壤养分的竞争，受土壤氮素的限制（图 4）。

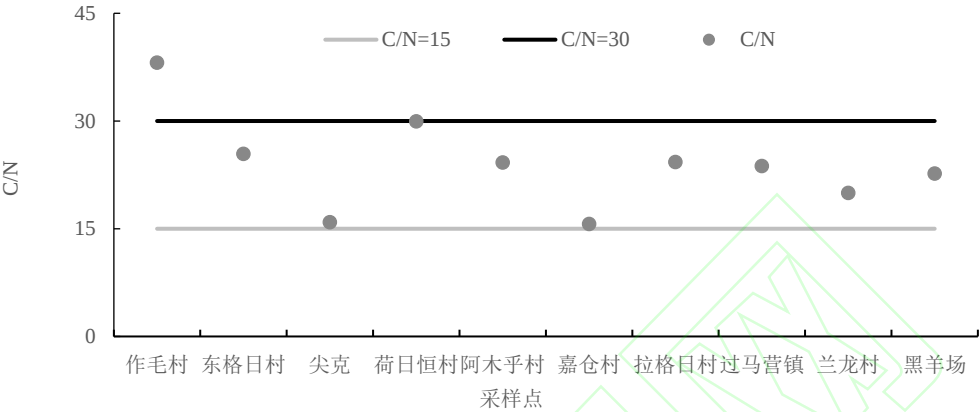


图 4 采样点碳氮比

Fig. 4 Carbon-nitrogen ratio at sampling points

4 结 论

土壤全氮的空间异质性是不同环境因子间相互耦合作用的结果，主要受地形（海拔、坡度等）、气候因素（温度、降水、积温）、植被类型及土壤类型的综合影响，不同环境因子对土壤全氮含量的影响存在很大的差异。

（1）不同植被类型的土壤全氮含量存在明显的差异，表现为线叶嵩草草甸>小嵩草草甸>紫花针茅草原>西藏嵩草+薹草草甸>青海固沙草草原>异针茅草原>小嵩草+矮嵩草草甸，对应的土壤为：草甸土、黑钙土、黑毡土、草毡土、栗钙土。

（2）区域内土壤全氮含量与海拔、坡度、坡向、地形起伏度和植被类型呈正相关；与年降水量、 $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温、年平均气温、土壤类型呈显著负相关。其中海拔、坡度、年平均降水量贡献率最高，均为 1； $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温、年均气温、地形起伏度、植被类型、土壤类型分别为 0.72、0.74、0.59、0.88、0.17。

（3）年均气温与土壤类型、地形起伏度、植被类型，地形起伏度与植被类型、土壤类型，植被类型与土壤类型相互间对土壤全氮含量的影响为非线性相互增强，而其余因子之间对全氮含量的作用为非线性减弱。说明土壤全氮含量的空间变异性是各环境因子共同作用的结果，不同环境因素之间的交互作用存在显著差异，当两个适宜全氮积累的环境驱动因子叠加时，其对全氮含量空间异质性分布的综合影响增强，揭示了土壤全氮含量空间异质性分布影响因子的多样性和复杂性。

参考文献

- 白永飞, 许志信, 李德新. 2002. 内蒙古高原针茅草原群落土壤水分和碳、氮分布的小尺度空间异质性. 生态学报, 22(8): 1215-1223.
- 陈昌玲, 张全景, 吕 晓, 等. 2016. 江苏省耕地占补过程的时空特征及驱动机理. 经济地理, 36(4): 155-163.
- 崔 倩, 潘存德, 李贵华, 等. 2018. 喀纳斯泰加林群落物种多样性环境解释与自然火干扰. 生态学杂志, 37(6): 1824-1832.
- 杜满义, 封焕英, 张连金, 等. 2018. 华北石质山区不同植被恢复类型土壤碳、氮特征. 生态学杂志, 37(6):

- 1849-1855.
- 耿晓东, 旭日, 魏 达. 2017. 多梯度增温对青藏高原高寒草甸温室气体通量的影响. 生态环境学报, **26**(3): 445-452.
- 郭继勋, 祝廷成. 1994. 羊草草原枯枝落叶积累的研究——枯枝落叶积累对草原生态环境及生产力的作用. 草业科学, (6): 12-16.
- 韩文轩, 吴 漪, 汤璐璘, 等. 2009. 北京及周边地区植物叶的碳氮磷元素计量特征. 北京大学学报: 自然科学版, **45**(5): 855-860.
- 李 涛, 廖和平, 褚远恒, 等. 2016. 重庆市农地非农化空间非均衡及形成机理. 自然资源学报, **31**(11): 1844-1857.
- 李迪强, 林英华, 陆 军. 2002. 尤溪县生物多样性保护优先地区分析. 生态学报, **22**(8): 1315-1322.
- 李国荣, 李希来, 陈文婷, 等. 2018. 降雨侵蚀对退化草地土壤养分含量的影响. 水土保持研究, **25**(2): 40-45.
- 李林海, 郇二虎, 梦 梦, 等. 2013. 黄土高原小流域不同地形下土壤有机碳分布特征. 生态学报, **33**(1): 179-187.
- 李宇庆, 陈 玲, 赵建夫. 2006. 土壤全氮测定方法的比较. 广州环境科学, (3): 28-29.
- 李张敏, 陈伏生, 方向民, 等. 2018. 残落物去除对杉木林4种林下植物养分含量和化学计量比的影响. 生态学杂志, **37**(7): 2092-2099.
- 廖 颖, 王心源, 周俊明. 2016. 基于地理探测器的大熊猫生境适宜度评价模型及验证. 地球信息科学学报, **18**(6): 767-778.
- 刘 伟, 程积民, 高 阳, 等. 2012. 黄土高原草地土壤有机碳分布及其影响因素. 土壤学报, **49**(1): 68-76.
- 刘秉儒, 张秀珍, 胡天华, 等. 2013. 贺兰山不同海拔典型植被带土壤微生物多样性. 生态学报, **33**(22): 7211-7220.
- 刘世梁, 马克明, 傅伯杰, 等. 2015. 北京东灵山地区地形土壤因子与植物群落关系研究. 植物生态学报, **27**(4): 496-502.
- 潘红丽, 李迈和, 蔡小虎, 等. 2009. 海拔梯度上的植物生长与生理生态特性. 生态环境学报, **18**(2): 722-730.
- 余冬立, 邵明安, 俞双恩. 2010. 黄土高原水蚀风蚀交错带小流域土壤矿质氮空间变异性. 农业工程学报, **26**(6): 89-96.
- 宋贤冲, 郭丽梅, 田红灯, 等. 2017. 猫儿山不同海拔植被带土壤微生物群落功能多样性. 生态学报, **37**(16): 5428-5435.
- 孙鸿烈, 郑 度, 姚檀栋, 等. 2012. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设. 地理学报, **67**(1): 3-12.
- 王 瑞, 王 平, 高永恒, 等. 2018. 土壤水分波动对高寒草甸生态系统 CO₂ 和 N₂O 排放的影响. 草业科学, **35**(2): 266-275.
- 王常慧, 邢雪荣, 韩兴国. 2004. 温度和湿度对我国内蒙古羊草草原土壤净氮矿化的影响. 生态学报, **24**(11): 2472-2476.
- 王根绪, 李元首, 吴青柏, 等. 2006. 青藏高原冻土区冻土与植被的关系及其对高寒生态系统的影响. 中国科学(D 辑: 地球科学), **36**(8): 743-754.
- 王合云, 董 智, 郭建英, 等. 2015. 不同放牧强度对大针茅草原土壤全土及轻组碳氮储量的影响. 水土保持学报, **29**(6): 101-106.
- 王劲峰, 徐成东. 2017. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, **72**(1): 116-134.
- 肖胜生, 郑海金, 杨 洁, 等. 2011. 土壤侵蚀/水土保持与气候变化的耦合关系. 中国水土保持科学, **9**(6): 106-113.
- 许明祥. 2003. 黄土丘陵区生态恢复过程中土壤质量演变及调控(博士学位论文). 杨凌: 西北农林科技大学.
- 杨 忍, 刘彦随, 龙花楼, 等. 2015. 基于格网的农村居民点用地时空特征及空间指向性的地理要素识别——以环渤海地区为例. 地理研究, **34**(6): 1077-1087.
- 杨 忍, 刘彦随, 龙花楼, 等. 2016. 中国村庄空间分布特征及空间优化重组解析. 地理科学, **36**(2): 170-179.

- 云建英, 杨甲定, 赵哈林. 2006. 干旱和高温对植物光合作用的影响机制研究进展. 西北植物学报, **26**(3): 641-648.
- 张建文, 徐长林, 杨海磊, 等. 2017. 高寒草甸冷季放牧对凋落物分解及 C、N、P 化学计量特征的影响. 草业科学, **34**(10): 37-44.
- 张兴昌, 刘国彬, 付会芳. 2000. 不同植被覆盖度对流域氮素径流流失的影响. 环境科学, (6): 16-19.
- 张亚亚. 2017. 青藏高原植物-土壤碳氮磷化学计量特征及其对环境因子的响应(硕士学位论文). 天津: 天津师范大学.
- 周华坤, 周兴民, 赵新全. 2000. 模拟增温效应对矮嵩草草甸影响的初步研究. 植物生态学报, **24**(5): 547-553.
- 周慧珍, 龚子同. 1996. 土壤空间变异性研究. 土壤学报, (3): 232-241.
- 朱志诚, 黄可. 1993. 陕北黄土高原森林草原地带植被恢复演替初步研究. 山西大学学报: 自然科学版, (1): 94-100.
- 邹丽娜, 周志宇, 颜淑云, 等. 2009. 玛曲高寒草地土壤养分对不同利用方式的响应. 中国草地学报, **31**(6): 80-87.
- Caldwell TG, Young MH, Zhu J, *et al.* 2008. Spatial structure of hydraulic properties from canopy to interspace in the Mojave Desert. *Geophysical Research Letters*, **35**: 524-532.
- Ineson P, Taylor K, Harrison AF, *et al.* 1998. Effects of climate change on nitrogen dynamics in upland soils. 1. A transplant approach. *Global Change Biology*, **4**: 143-152.
- Jones FA, Hamrick JL, Peterson CJ, *et al.* 2010. Inferring colonization history from analyses of spatial genetic structure within populations of *Pinus strobus* and *Quercus rubra*. *Molecular Ecology*, **15**: 851-861.
- Leiros MC, Trasar-Cepeda C, Seoane S, *et al.* 1999. Dependence of mineralization of soil organic matter on temperature and moisture. *Soil Biology and Biochemistry*, **31**: 327-335.
- Lou CR, Liu HY, Li YF, *et al.* 2016. Socioeconomic drivers of PM2.5 in the accumulation phase of air pollution episodes in the Yangtze River Delta of China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **13**: 928.
- Pau S, Wolkovich EM, Cook BI, *et al.* 2011. Predicting phenology by integrating ecology, evolution and climate science. *Global Change Biology*, **17**: 3633-3643.
- Singer FJ, Schoenecker KA. 2003. Do ungulates accelerate or decelerate nitrogen cycling? *Forest Ecology and Management*, **181**: 189-204.
- Stanford G, Smith SJ. 1972. Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Science Society of America Journal*, **36**: 465-472.
- Xu LL, Zhang X, Shi P, *et al.* 2005. Establishment of apparent quantum yield and maximum ecosystem assimilation on Tibetan Plateau alpine meadow ecosystem. *Science in China Series D*, **48**: 141-147.
- Zhang N, Jing YC, Liu CY, *et al.* 2016. A cellular automaton model for grasshopper population dynamics in Inner Mongolia steppe habitats. *Ecological Modelling*, **329**: 5-17.

作者简介 苟照君, 女, 1993 年生, 硕士研究生, 主要从事自然地理综合研究。E-mail: gzj1129@126.com

责任编辑 张敏