

高寒草原草甸区土壤侵蚀及植被覆盖对 养分空间分布的影响

——以兴海盆地子科滩为例

陈泽涛^{1,2}, 沙占江^{1,2}, 王求贵³, 余迪⁴, 胡菊芳³, 马玉军^{1,2}

(1.青海师范大学 地理科学学院, 西宁 810008; 2.青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室,
西宁 810008; 3.中国科学院 青海盐湖研究所, 西宁 810008; 4.青海省气候中心, 西宁 810001)

摘 要:为探索高寒草原草甸区土壤中养分的空间分布特征及其影响因素,通过遥感解译分类、¹³⁷Cs 示踪土壤侵蚀以及土壤化学方法相结合,研究了高寒草原草甸兴海盆地子科滩不同植被类型、植被盖度以及土壤侵蚀强度下的土壤养分的空间分布及差异。结果表明:植被盖度与 TN, OM, EXT-P 呈 $p < 0.01$ 水平上显著正相关,与 EXT-N 呈 $p < 0.05$ 水平上显著正相关,表明 TN, OM 和 EXT-N 对高寒草原草甸地表植物的生长有着显著积极的影响。高寒草甸土壤中的 OM, TN, EXT-N, EXT-P 以及 EXT-K 的含量高于高寒草原的原因因为高寒草甸植被密度大且覆盖有约 15 cm 厚的植毡层。研究区植被盖度越高,则土壤侵蚀强度越弱。土壤养分 OM, TN, EXT-N, EXT-P 呈现出从西南到东北逐渐降低的趋势,而土壤侵蚀强度变化趋势与之相反。因此地表植被状况良好与否对高寒草原区土壤养分的存贮和降低水土流失均具有重要的生态意义。

关键词:高寒草原草甸; 土壤侵蚀; 植被覆盖; 土壤养分; 空间分布

中图分类号:S157; Q948

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)06-0226-09

Effects of Soil Erosion and Vegetation Cover on Spatial Distribution of Nutrients in Alpine Grassland Meadow Area

—A Case Study of Ziketang in Xinghai Basin

CHEN Zetao^{1,2}, SHA Zhanjiang^{1,2}, WANG Qiugui³, YU Di⁴, HU Jufang³, MA Yujun^{1,2}

(1.College of Geographical Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810008, China; 2.Key Laboratory of Tibetan Plateau Land Surface Processes and Ecological Conservation, Ministry of Education, Xining 810008, China; 3.Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China; 4.Qinghai Climate Center, Xining 810001, China)

Abstract: In order to explore the spatial distribution of soil nutrients of alpine meadow grassland area and its influencing factors, we combined the methods of the remote sensing interpretation classification, the soil erosion trace by ¹³⁷Cs and soil chemical analysis to investigate the spatial distributions and differences of soil nutrients in the different vegetation types, vegetation coverage and different intensities of soil erosion in the alpine grassland-meadow in Ziketang of Xinghai Basin in Qinghai-Tibet Plateau. The vegetation coverage was significantly positively correlated with TN, OM, EXT-P ($p < 0.01$), and EXT-N ($p < 0.05$), indicating that growth of surface plants in alpine grassland-meadow was significantly positively influenced by TN, OM and EXT-N. The contents of OM, TN, EXT-N, EXT-P and EXT-K in soil of alpine meadow were higher than those in soil of alpine grassland because the 15 cm thick plant litter distributed on the soil surface in alpine meadow. The higher the vegetation cover is in the study area, the slighter intensity of soil erosion is. Soil OM, TN, EXT-N, and EXT-P showed the decreasing trend from southwest to northeast, while the trend of

收稿日期:2018-12-18

修回日期:2019-01-10

资助项目:青海省科技厅应用基础研究项目“基于 GIS 和多核素的高寒草原区不同时间尺度的土壤侵蚀示踪研究”(2019-ZJ-7021)

第一作者:陈泽涛(1993—),男,甘肃静宁人,硕士研究生,研究方向为环境遥感与地理信息系统。E-mail:Clement1018@126.com

通信作者:沙占江(1971—),男,青海西宁人,教授,博士生导师,主要从事高原环境现状、变化及过程研究。E-mail:sazhanjiang@sina.com

soil erosion intensity was opposite to these indices. Therefore, the status of the vegetation was of significant importance to the storage of soil nutrients and the reduction of intensity of soil erosion in the alpine grass-land-meadow ecosystem.

Keywords: alpine steppe meadow; soil erosion; vegetation cover; soil nutrient; spatial distribution

土壤是作物赖以生存的物质基础,是决定植物生长状况的首要条件,同时也是植物生长所需氮、磷、钾等养分的主要来源^[1-3]。土壤养分的空间变化很大程度上影响着植物生长及空间分布,在一定程度上可以改变土地利用结构^[4-5]。而植被覆盖状况、土地利用结构的改变会反作用于土壤,使得土壤养分含量在空间上发生变化,二者互为因果^[6-7]。在青藏高原,草地是最主要的植被类型,占青海—西藏高原植被总面积的 63.9%^[8]。该区域近年来围绕高寒草原草甸、土壤环境、以及生态环境变化的研究成果很多。如土壤退化与草地退化关系的研究^[9-12];草原草甸区土壤与植被之间的相互作用及其关系的研究^[13-18]。

本研究通过土壤化学方法来对高寒草原草甸区兴海盆地子科滩土壤 TN(全氮)、TP(全磷)、TK(全钾)、EXT-N(碱解氮)、EXT-P(速效磷)、EXT-K(速效钾)以及 OM(有机质)的空间分布及其空间关系进行研究;结合遥感方法监测植被生长状况及¹³⁷Cs 法分析土壤侵蚀强度,分析在不同的植被覆盖类型、不同的植被覆盖度以及不同的土壤侵蚀强度下的土壤养分的空间分布特征,探索土壤侵蚀、植被覆盖以及植被类型对土壤养分空间分布的影响。为该地区生态环境保护、土壤侵蚀预防与治理等提供基础资料与科学依据。

1 研究区概况

研究区位于青藏高原东北部,地理坐标为 35°30′—35°55′N,99°38′—100°14′E(图 1)。为新生代山间断陷切割盆地,其东北部为昆仑系河卡山,大河坝河流经盆地西南边界注入黄河,盆地位于河卡山与大河坝河之间^[19]。除西北部有部分山地、东部发育为第四纪河湖相沉积物形成的砾石沟谷外,其余均较为平坦。海拔为 2 500~4 600 m,区内面积 1 234.84 km²,年均温-4~1℃,年降水量 300 mm,年蒸发量 1 680 mm。属于典型的高原大陆性气候,空气稀薄,日照充足、辐射强烈,热量条件差,气候干燥、寒冷。风力侵蚀、水力侵蚀、风力水力复合侵蚀以及冻融侵蚀等侵蚀类型均在该区域分布。研究区属于高寒草甸与高寒草原过度地带,主要以高寒草甸土、高山草原土、栗钙土、风沙土为主。植被类型主要以高山嵩草

(*Kobresia pygmaea*)草甸和芨芨草(*Achnatherum splendens*)草原、紫花针茅(*Stipa purpurea*)草原为主,有小面积的灌丛和乔木在河谷低地阳坡发育。

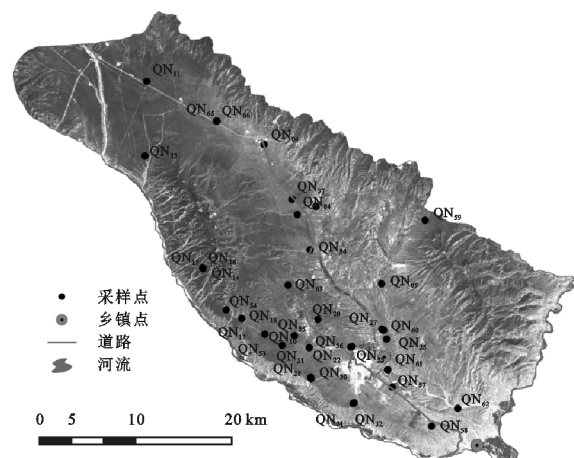


图 1 采样点分布

2 研究方法及手段

本研究所有的空间数据采用 Albers 等面积圆锥投影,中央经线为 99°40′,标准纬线为 35°30′,该投影可以最大限度减少由投影方式带来的面积变形^[20]。将 landsat 8 OLI 遥感影像数据、土壤养分和¹³⁷Cs 采样点坐标统一进行投影变换,为下一步研究工作做准备。

2.1 遥感数据获取与处理

本研究主要通过 landsat 8 OLI 影像(p133,r35, p133,r36;2016/07/01 地理空间数据云平台)数据分类提取得到研究区植被覆盖类型;VFC 提取采用像元二分模型获得^[21-23],该模型已被广泛应用于 VFC 计算,其假定遥感影像由绿色植被信息 and 无植被信息(裸地)组成,VFC 计算多采用 NDVI 数据,估算公式为:

$$VFC = \frac{(NDVI - NDVI_{soil})}{(NDVI_{veg} - NDVI_{soil})} \quad (1)$$

式中:NDVI 为影像中各像元的归一化植被指数;NDVI_{soil} 和 NDVI_{veg} 分别为全裸土覆盖像元和全植被覆盖像元的 NDVI 值,分别由高分二号卫星 PMS2 影像获得(2016 年 6 月 17 日),数据来源于青海省高分中心(<http://qhgis.cn/>),坡度、坡向等信息则是通过 1:30 m 的 DEM 提取所得,数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)。将地表形态因子坡度、

坡向、高程等以及 1:100 万土壤类型图、VFC 和植被覆盖类型等参考因子进行综合分析。结合区域景观特征分析土壤养分空间分布的差异。

2.2 土壤样品获取与处理

分别于 2016 年 6 月和 2017 年 9 月采集土壤样品共 128 个。其中采集 ^{137}Cs 分层样 72 个,其中平行样 12 个。所有样品称重并用聚乙烯自封袋密封带回实验室。样品剔除石子和植物根系,放入 60℃ 烘箱进行恒温烘干至恒重,分层样品研磨混匀后过 20 目筛子,样品装入离心管并密封,样品测试采用美国 CANBERRA 公司生产的 GCW-3525 高纯锗 γ 能谱仪,能量测定范围为 $3\sim 3\times 10^3$ KeV,相对探测效率为 50.2%,能量分辨率为 2.2 KeV,利用 Genie-2000 谱分析软件提取 ^{137}Cs 的谱数据,通过对 ^{137}Cs 的 γ 能量峰 661.7KeV(85%)进行计算,其重复测量相对误差小于 5%。测定的样品用 IAEA-SOIL-2(09~03)-T5 进行标定。测定工作在青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室进行。

同时采集自地表向下 0—15 cm 全样 56 个。全样采用剖面竖切的方法采集立方体土柱,土壤全样将大块团块状土壤样品捏碎即可,混匀后,取 100 g 样品进行 TN,TP,TK,EXT-N,EXT-P,EXT-K,OM 以及 pH 值的测定,其中 OM 测定采用重铬酸钾氧化法、TN 采用凯氏定氮法、TP 用酸溶—钼锑抗比色法、TK 用酸溶—火焰光度法、EXT-N 用扩散吸收法、EXT-P 用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法、EXT-K 用乙酸铵浸提—火焰光度法^[24]。养分测定试验委托青海大学农林科学院土壤肥力研究所进行。土壤养分经过数据筛选、异常值的处理以及正态变换检验后,将不符合正态分布的数据进行正态变换并进行地统计分析以及克里格插值。

2.3 地统计学方法

地统计学方法是基于区域化变量理论基础上的—种统计方法,被广泛应用于土壤特性空间变异方面的研究^[25-27],本文中只做简要说明。假设区域化变量满足二阶平稳假设,其半方差函数公式^[28]如下:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} |Z(X_i) - Z(X_i + h)|^2 \quad (2)$$

式中: $\gamma(h)$ 为半方差函数; h 为分隔两样点的矢量,称为步长; $N(h)$ 为相距为 h 的样点对数目; $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别为区域化变量 $Z(x)$ 在位置 x_i 和 $x_i + h$ 处的实测值。

空间变量数据的非平稳性比较常见,只要变量在

适度大小的邻域内满足平稳性,仍然可以得出合理的统计分析结果^[29]。因此选择一个稳定的半方差函数以及合适的邻域对地统计制图非常关键。

克里格插值法是一种最优无偏线性估值方法^[30]。对变量在点 x 处的估计值 $Z^*(x)$ 可以通过该点影响范围内的 n 个有效观测值 $Z(x_i)$ 的线性组合得出,即:

$$Z^*(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i) \quad (3)$$

式中: λ_i 是赋予观测值 $Z^*(x_i)$ 的权重,表示各观测值对估计值 $Z^*(x)$ 的贡献,其和为 1,在保证估值无偏性(即估计偏差的平均值为 0)和最优性(即估计值方差最小)条件下,可由变量半方差函数计算得到。克里格法在进行最优无偏估值的同时,还能得出变量的估计方差^[31],这对提高制图精度意义重大。

本研究半方差函数的计算和理论模型的拟合均采用地统计学软件 GS+进行,各项异性半方差函数计算时的角度容差(tolerance)定向为 $\pm 22.5^\circ$ 。最优模型的选择主要参考模型拟合的决定系数 R^2 和残差 RSS,一般认为,拟合模型的决定系数 R^2 越大,残差 RSS 越小,拟合精度越高^[28]。克里格插值由 ArcGIS 10.2 完成,生成 grid 数据后按照研究区边界裁剪得到研究区土壤养分插值栅格图。

3 结果与分析

3.1 植被类型空间分布

对 landsat 8 数据进行遥感解译并进行精度评价,采用随机选取检验区法,选取 350 个地面真实样本进行精度评价,分类结果为 83%,Kappa 系数为 0.84(附图 2)。研究区以高寒草原、草甸为最主要的植被类型,其中芨芨草原面积为 394.27 km²,占研究区面积的 31.92%,广泛分布在研究区南部大部分地区以及东北部山地缓坡处;高山嵩草草甸面积为 371.93 km²,占研究区面积的 30.11%,主要分布在研究区西部、西北部海拔较高的坡地。紫花针茅草原面积为 268.23 km²,占研究区总面积的 21.71%,在研究区中部低地分布;砾石沟谷面积为 79.94 km²,占评价区面积的 6.47%,主要分布在研究区南部。该区域为沟谷地貌,以第三纪沉积岩层为主;圆囊苔草(*Carex orbicularis*)沼泽和河流面积分别为 12.46, 20.68 km²,占研究区面积的 1.01%,1.67%;居民地和耕地面积分别为 9.09,6.79 km²,占研究区总面积的 0.74%, 0.55%;人工林占研究区面积的 0.10%,零星分布在子科滩南部;山杨林占研究区面积的 0.55%,零星分布在大河坝河河谷低地;锦鸡儿(*Caragana sinica*)灌丛零星分布

在河卡山南麓,金露梅(*Potentilla fruticosa*)灌丛零星分布在南部河流沟谷缓坡处,分别占研究区总面积的 0.11%,0.07%。总体分类效果较好,但是其中部分类型分类精度相对较低,尤其是草原草甸过度地带以及河流、沟谷等地区,受遥感影像精度的限制以及地形、高程等的影响,降低了分类精度。

3.2 VFC 分级提取

根据像元二分模型对研究区植被覆盖度进行计算,得到该区域植被覆盖度图,本图采用通常的 5 级表示法(0~0.2,0.2~0.4,0.4~0.6,0.6~0.8,0.8~1)(附图 3)。

从附图 3 可以看出,研究区西部、西北部以及东部部分地区盖度较高,约在 0.8 以上,该区域植被类型以高寒草甸为主,植被覆被状况良好;研究区中部及中南部缓坡处,植被盖度相对较低,以高寒草原为主,植被盖度为 0.4~0.8;植被盖度最低的位置为研究区南部的砾石沟谷区域,植被覆盖极少(0.2~0.4);河流、裸岩、居民地等盖度为 0。

表 1 各采样点土壤侵蚀模数

采样点	容重/ (g·cm ⁻³)	土壤侵蚀模数/ (t·km ⁻² ·a ⁻¹)	侵蚀强度	采样点	容重/ (g·cm ⁻³)	土壤侵蚀模数/ (t·km ⁻² ·a ⁻¹)	侵蚀强度
QN ₀₄	1.2569	227.84	轻度侵蚀	QN ₂₅	1.1016	-97.57	堆积
QN ₀₉	1.2009	318.76	轻度侵蚀	QN ₂₉	1.0807	379.78	轻度侵蚀
QN ₁₀	1.1795	500.06	轻度侵蚀	QN ₃₂	1.1576	-5.48	堆积
QN ₁₁	0.8158	53.98	微度侵蚀	QN ₃₅	1.2845	-67.18	堆积
QN ₁₃	0.9167	377.25	轻度侵蚀	QN ₃₇	1.1642	-299.83	堆积
QN ₁₄	0.9065	-61.05	堆积	QN ₅₁	1.1665	899.77	轻度侵蚀
QN ₁₇	1.125	279.23	轻度侵蚀	QN ₅₄	1.1149	230.26	轻度侵蚀
QN ₁₈	1.1153	273.3	轻度侵蚀	QN ₅₇	1.1836	300.3	轻度侵蚀
QN ₂₀	1.0603	189.59	微度侵蚀	QN ₆₃	1.0858	-2.84	堆积
QN ₂₂	0.977	218.23	轻度侵蚀	QN ₆₅	1.478	97.09	微度侵蚀
平均值	1.118	190.57	微度侵蚀				

3.4 土壤养分的空间分布及关系

通过对兴海盆地子科滩土壤养分进行普通克里格插值,半方差函数模型及有关参数见表 2,经评价,7 种土壤养分均符合高斯模型,其中 OM 的拟合精度最高, R^2 为 0.887,RSS 为 13.7;TN,EXT-N,EXT-P 的 R^2 较高,分别为 0.764,0.729,0.725,RSS 分别为 1.8,3.83,0.67;TP,TK 以及 EXT-K 的 R^2 分别为 0.588,0.587,0.620,RSS 分别为 1.07,36.7,4.47。插值结果见图 2。研究区土壤养分中 OM,TN,EXT-N,EXT-P 空间分布规律明显,均呈现出从西南到东北逐渐降低的趋势,其中 OM 含量为 13.96~76.01 g/kg,TN 含量为 1.23~4.95 g/kg,EXT-N 含量为 52.01~297.50 mg/kg,EXT-P 含量为 1.38~11.85 mg/kg,最高值均出现在研究区西部的大河坝河以东

3.3 土壤侵蚀强度及其空间分布

研究区背景值以及各采样点面积活度平均为 $(1\,187.67\pm234.73)\text{ Bq/m}^2$ (平均值±标准差)^[32]。土壤侵蚀量利用非耕地土壤侵蚀模型进行计算^[33],其强度分级根据我国水利行业标准(SL190—2007)进行划分。

表 1 中 QN₃₇ 土壤侵蚀模数为 -299.83 t/(km²·a),该采样点位于研究区中部谷地,在坡面流水堆积作用明显[土壤侵蚀模数<0 t/(km²·a)],地表植被以紫花针茅草原为主要建群种,植被覆盖茂密(VFC>0.9)地形平坦(slope<2°);QN₁₁ 的土壤侵蚀模数为 53.98 t/(km²·a),该点位于研究区西南部缓坡处(slope<4°)、植被覆盖较密集(VFC>0.8)且地表植被以高山嵩草草甸为主要建群种,土壤侵蚀模数<200 t/(km²·a),侵蚀类型以微度侵蚀为主;采样点 QN₅₁ 所在区域土壤侵蚀模数为 899.77 t/(km²·a),该点位于研究区北部山区陡坡沟谷处,流水侵蚀发育明显(slope>25°),地表植被覆盖以金露梅灌丛为建群种,植被覆盖度低(VFC<0.1),为轻度侵蚀区域。

的区域;TP 含量为 0.82~1.82 g/kg,最高值位于研究区南部,最低值位于研究区北部,呈由南向北递减趋势;TK 含量为 19.63~28.57 mg/kg,最高值位于研究区中南部、子科滩镇所在地及周边地区,最低值位于研究区北部,由子科滩镇附近区域向周边递减;EXT-K 含量为 76.11~248.80 mg/kg,最高值位于研究区中南部,中部含量高于平均含量,呈由中部向南北方向递减的趋势。

植被盖度和植被类型的空间分布特征高度相关,而地表植被覆盖状况良好与否很大程度影响着土壤养分的积累和存储^[34],植被覆盖状况与土壤侵蚀关系密切^[35],它在防止土壤侵蚀中主要对降雨的削减、保水作用和抗侵蚀作用^[33]。

表 2 土壤养分半方差函数模型及有关参数

养分	理论模型	块金值/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	基台值/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	块金系数/%	变程/ km	决定系数/ R^2	残差
TN	G	0.630	4.27	14.75	41.07	0.764	1.8
TK	G	5.280	10.57	49.95	12.57	0.587	36.7
TP	G	0.830	3.69	22.52	53.97	0.588	1.07
OM	G	1.730	23.45	7.38	50.75	0.887	13.7
EXT-N	G	0.020	0.13	15.38	31.30	0.729	3.83
EXT-P	G	0.010	0.10	10.44	64.94	0.725	0.67
EXT-K	G	0.003	0.01	21.13	33.97	0.620	4.47

注:表中 G 表示高斯模型。

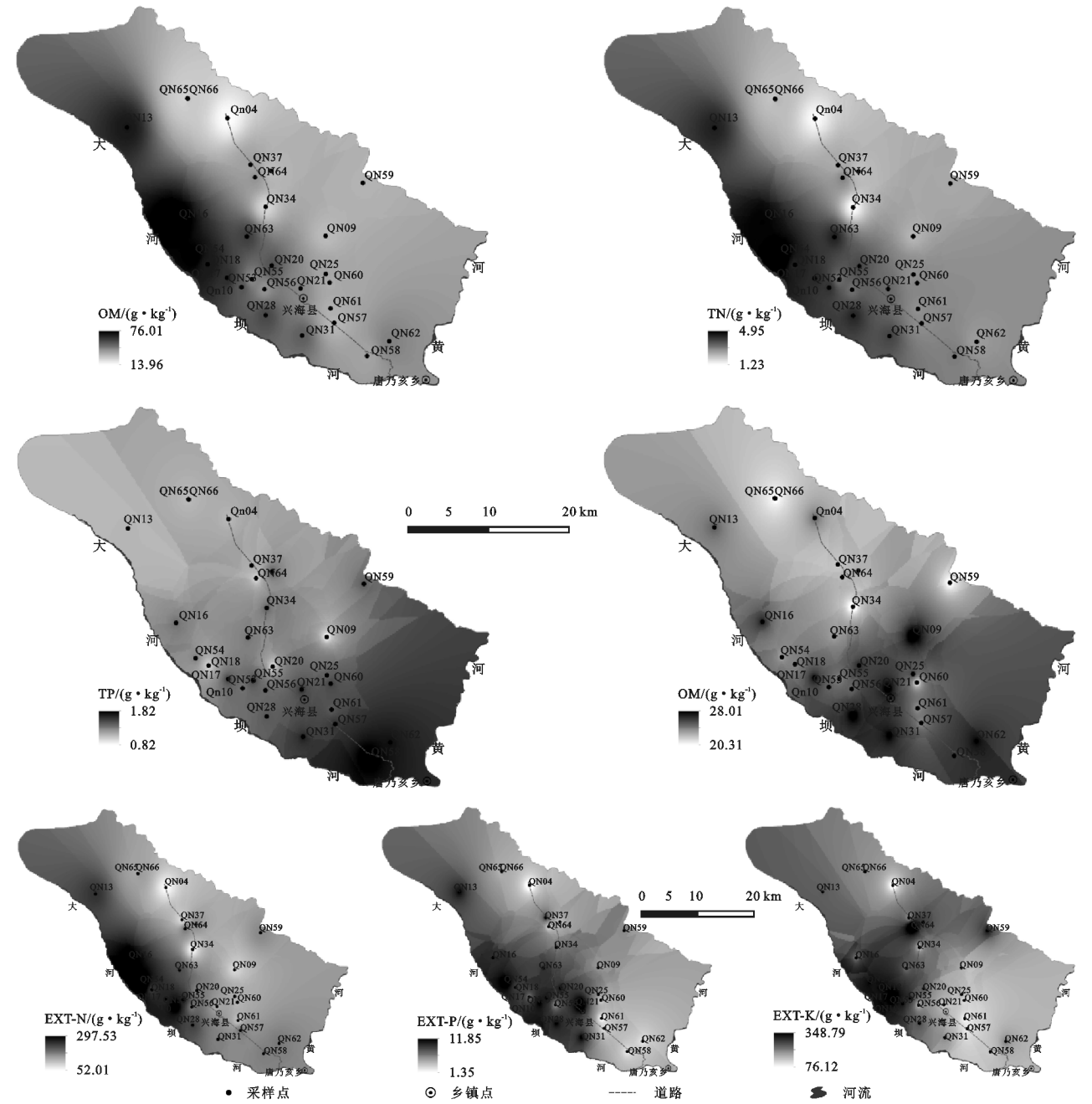


图 2 土壤养分插值

整体而言,研究区西部和西北部由于植被覆盖良好($0.8<\text{VFC}<1$),土壤侵蚀强度也随之较弱,代表采样点为QN₁₁[土壤侵蚀模数为 $53.98\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$],该

样点位于研究区西北部,214 国道左侧 2 km 处,主要植被类型为高山嵩草草甸,地表有地衣覆盖,植被盖度达到 0.8~1,属于微度侵蚀区域,该区域土壤

OM, TN, EXT-N, EXT-P 均达到最大值且向东部、东南部逐渐递减。随着海拔降低,研究区东部及中部缓坡处($\text{slope} < 5^\circ$)发育了高寒草甸和高寒草原过渡地带,该区域植被覆盖较好($0.6 < \text{VFC} < 0.8$),主要植被类型为紫花针茅草原化草甸和芨芨草针茅草原化草甸,但由于地处过渡带,生态系统较为脆弱^[36-37],土壤侵蚀发生较为明显,代表采样点为 QN₆₅ [土壤侵蚀模数为 $97.09 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$],该样点位于研究区中部,位于 214 国道右侧 1.5 km 处,侵蚀强度为微度侵蚀,该区域 7 种土壤养分均呈现自西向东逐渐降低趋势;研究区中部地势平坦,植被盖度比东西两侧较差($0.4 < \text{VFC} < 0.6$),比南部区域植被覆盖状况要好,土壤侵蚀较为强烈,代表样点为 QN₂₂ [土壤侵蚀模数 $218.23 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$],采样点位于兴海县城北部,属于轻度侵蚀,该区域主要发育为典型的高

寒草原,植被稀疏,盖度较低,因此地表裸露面积较大,随之土壤养分的流失也较多,该区域 OM, TN, TP, TK, EXT-N 含量均为全区域最低值;研究区南部及东南部部分区域($0.2 < \text{VFC} < 0.4$)植被盖度很低,区域地形复杂,以第三纪沉积岩层、砾石沟谷发育为主,植被难以生长,该区域侵蚀较强且地表无土壤发育,因此未采集土壤样品。河流、居民地等无植被覆盖。总之,植被盖度和植被类型对土壤侵蚀具有巨大的作用力,三者对土壤养分含量的空间分布产生着重大影响。

4 讨论

4.1 植被盖度与土壤养分含量之间的关系

将采样点的植被盖度与采样点各类养分数据进行相关分析,结果见表 3。

表 3 VFC 与土壤养分相关性分析

指标	VFC	TN	TP	TK	EXT-N	EXT-P	EXT-K	OM
VFC	1.000	0.486**	-0.397*	0.027	0.447*	0.488**	0.399*	0.559**
TN		1.000	-0.020	0.318	0.868**	0.612**	0.446**	0.949**
TP			1.000	0.040	0.069	-0.041	-0.229	-0.091
TK				1.000	0.125	0.290	0.053	0.306
EXT-N					1.000	0.490**	0.564**	0.822**
EXT-P						1.000	0.214	0.597**
EXT-K							1.000	0.477**
OM								1.000

注:**代表 0.01 水平上显著相关,*代表 0.05 水平上显著相关,下表同。

研究区植被盖度与养分之间的相关性分析表明:植被盖度与土壤中的 TN, OM, EXT-P 呈极显著相关($p < 0.01$),与 EXT-N 显著相关($p < 0.05$)。这与陈涛等^[38]在藏北高原的研究结果一致,土壤养分中 TN 和 OM 含量与植被覆盖、微生物等作用有密切关系,土壤中氮素主要来源于植物的固氮作用且主要在表层土壤中富集,植物的生长使得氮大量富集到地表;高寒草原草甸 OM 主要是由植物的残体腐烂产生的,并富集在表层,植被生长茂盛的区域生物量丰富,OM 的含量也高^[38],因此当植物盖度高时, TN 和 OM 含量则相对较高,两者正相关。以嵩草草甸为优势群落的高寒草甸土壤中,95%以上的氮素形态是有机氮,但随着植被退化,OM 含量降低,引起土壤有机氮含量减少^[39]。前人在青海果洛等地的高寒草地对土壤(0—20 cm)中的 OM 及 TN 含量的研究发现随着 VFC 的增加呈显著的正相关^[40]。因此研究区土壤中的 TN 和 OM 对高寒草原草甸地表植物的生长有着显著的、积极的影响,同时土壤 TN, OM, EXT-N 含量可以作为衡量高寒草原草甸退化程度的重要指标。

磷主要通过原生矿物的风化作用进入生态系统^[41],主要来源于岩石的缓慢矿化(钙磷灰石、氟磷灰石等)^[42];土壤磷按化学结构可分为有机磷和无机磷两种形态,在大多数土壤中,磷以无机形态为主,主要以正磷酸盐的形式存在,焦磷酸盐的数量很少;有机形态的磷含量较低,而且变幅较大。其溶解度可分为水溶性磷、枸溶性磷和难溶性磷^[43]。土壤中的 EXT-P 是指能为当季植物吸收的磷量,主要以无机磷为主。磷的迁移率很低,主要在植物根系富积,有机胶体或无机胶体对磷酸根产生吸附作用^[44],植物所需磷素的唯一来源是通过根系从土壤中吸收^[45],因此土壤中 EXT-P 供应充足的区域,植物可吸收的 EXT-P 越多,其植被生长状况越好,盖度越高^[46-51]。前人在黄土高原森林边缘区域退耕地的研究中认为 EXT-P 可能受植被恢复状况的影响,但与其他养分的相关性很小。TP 与植被的生长并无密切相关关系,然而本次研究表明 EXT-P 与 TN, EXT-N 呈极显著相关($p < 0.01$)。

本研究主要对比了高寒草原和高寒草甸植被下土壤养分的含量分布状况,主要植被类型有高山嵩草草

甸、线叶嵩草 (*Kobresia capillifolia*) 草甸, 紫花针茅草原、芨芨草草原。因为高山嵩草草甸和线叶嵩草草甸植被类型属于同一个植被型, 紫花针茅草原和芨芨草草原属于一个植被型, 因此选取了高寒草原和高寒草甸植被类型的 4 组采样点来进行探讨, 其侵蚀强度等级均为轻度侵蚀、植被盖度相近(0.6~0.9), 分组情况见表 4。

由表 4 可以得出, 4 组采样点的植被盖度为 0.6~0.9, 土壤侵蚀模数为 218.23~379.78 t/(km²·a), 且 4 组采样点植被盖度从 A—D 逐步递减, 土壤侵蚀模数逐步递增, 4 组采样点均为轻度侵蚀。

由图 3 可知, 高寒草甸土壤中的 OM, TN, EXT-N, EXT-P 以及 EXT-K 的含量要高于高寒草原土壤中的养分。该现象与两种植被型特点有关, 高寒草甸中草丛生长密集、根系密、表层覆盖有植毡层^[49], 表层向下有约 15 cm 厚的草皮层, 虽然高寒草原植被根系也很发达, 但其植被密度较小, 生长海拔比高寒草甸低, 更容易受到风力、水力侵蚀, 容易造成地表养分流失^[50], 因此 OM 总体储量前者要高于后者; 高寒草甸植被根系在 0—15 cm

交错分布, 生物量较为丰富, 动植物残体的分解使得土壤表层的速效养分再次富集。同时高寒草甸地表具有厚密的植毡层, 可以有效的保存土壤中的养分, 因此高寒草甸土壤养分中的 OM, TN, EXT-N 和 EXT-P 含量要高于高寒草原植被。土壤中钾素和全磷的供应主要受成土母质和矿化作用的影响^[51], 和植被的关系并不明显。

表 4 不同植被覆盖下采样点土壤侵蚀对比

编号	采样点	植被盖度	侵蚀模数/ (t·km ⁻² ·a ⁻¹)	侵蚀强度	植被类型
A	QN22	0.86	218.23	轻度侵蚀	紫花针茅草原
	QN54	0.82	230.26	轻度侵蚀	高山嵩草草甸
B	QN18	0.79	273.3	轻度侵蚀	芨芨草草原
	QN17	0.73	279.23	轻度侵蚀	矮嵩草草甸
C	QN57	0.78	300.3	轻度侵蚀	芨芨草草原
	QN13	0.72	377.25	轻度侵蚀	矮嵩草草甸
D	QN09	0.71	318.76	轻度侵蚀	紫花针茅草原
	QN29	0.63	379.78	轻度侵蚀	高山嵩草草甸

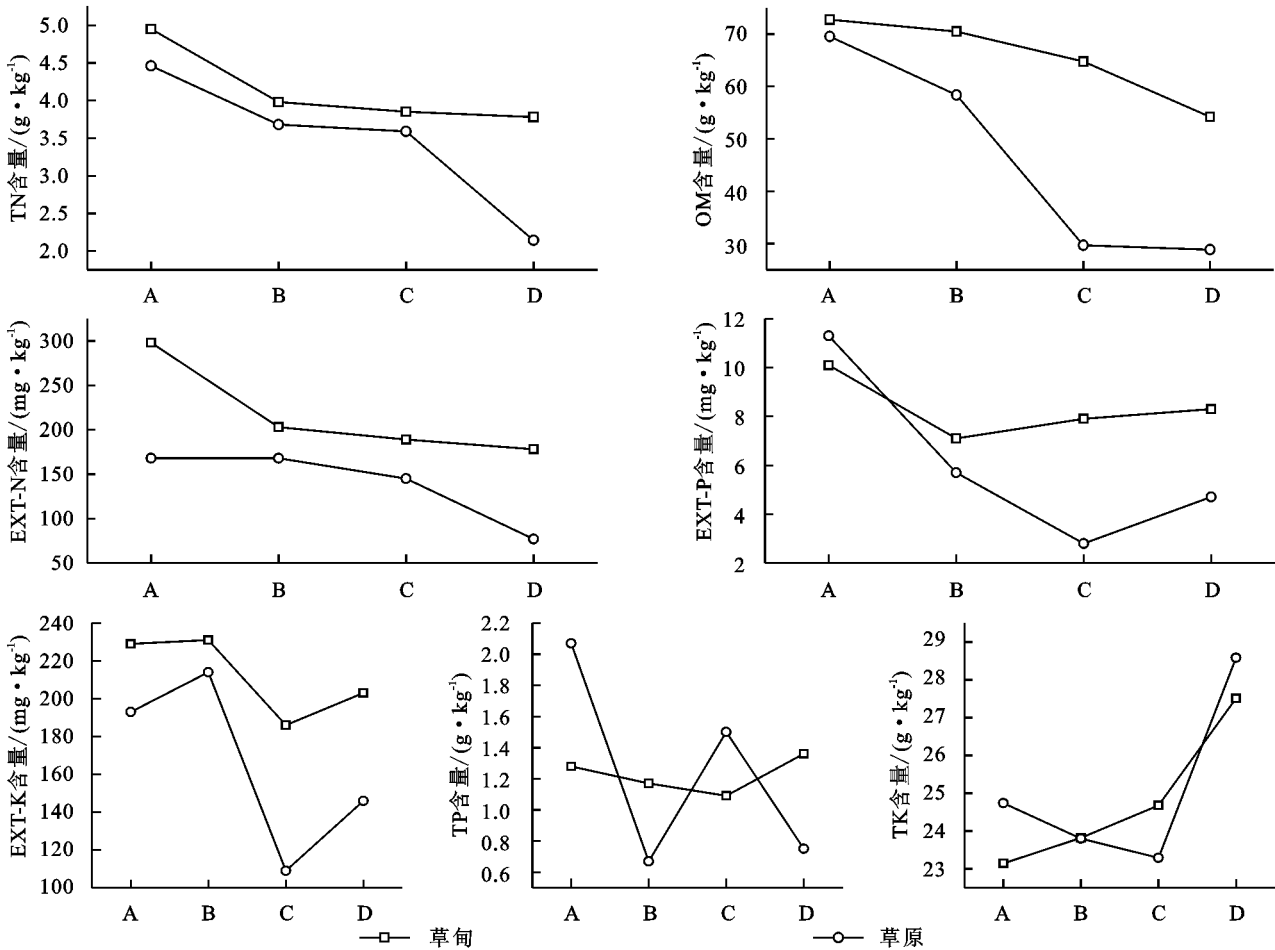


图 3 不同植被型下养分含量对比

4.2 土壤侵蚀强度与土壤养分之间的关系

研究区土壤侵蚀模数与养分的相关分析表明(表 5), 土壤中 TN 和 OM 与土壤侵蚀模数之间呈显著

负相关关系($p<0.05$), 土壤侵蚀模数与 TK, EXT-N 相关程度相对较弱, 与 TP, EXT-P, EXT-K 无明显相关关系。研究区 TN 与 OM, EXT-N, EXT-P, EXT-K 呈

$p<0.01$ 水平上显著相关关系。

研究区土壤侵蚀模数与 TN 和 OM 的显著负相关说明土壤侵蚀影响着他们在土壤中的含量,主要原因是在发生土壤侵蚀的同时,附着在土壤颗粒中的养分也随之流失,土壤 OM 含量会显著下降^[52],因此当侵蚀程度较强时,土壤中 OM 含量较少,当侵蚀程度较弱时,土壤中 OM 含量较高。同样,前人研究发现青藏高原三江源区土壤侵蚀强度与 TN 和 OM 也有明显的负相关($p<0.01$)^[53],因此土壤 OM 和 TN 可作为衡

表 5 土壤侵蚀模数与土壤养分相关性分析

指标	土壤侵蚀速率	TN	TP	TK	OM	EXT-N	EXT-P	EXT-K
土壤侵蚀速率	1.000	-0.47*	0.074	0.421	-0.508*	-0.369	0.229	0.198
TN		1.000	-0.12	0.49	0.958**	0.867**	0.660**	0.476*
TP			1.000	0.046	-0.118	0.118	-0.049	-0.215
TK				1.000	0.109	-0.203	0.174	-0.147
OM					1.000	0.799**	0.607**	0.529*
EXT-N						1.000	0.556*	0.559*
EXT-P							1.000	0.215
EXT-K								1.000

5 结论

(1) 不同植被盖度下各类养分的分布状况有所不同,TN,OM 以及 EXT-P 与植被盖度呈显著相关关系,其变化能明显影响植被覆盖的变化,同时植被覆盖变化也能反作用于以上该类养分,二者相互影响。

(2) 不同植被类型下的土壤养分含量差异较为明显,从结果分析来看研究区以高寒草原、草甸为最主要的植被类型,占研究区面积的 83.74%。芨芨草草原和紫花针茅草原主要分布在研究区南部、东北山地缓坡处,高山嵩草草甸和线叶嵩草草甸主要分布在研究区西部和西北部,南部有第三纪沉积岩层分布,约占研究区的 6.7%,其他植被类型占研究区面积较小,分别为人工林、山杨林、金露梅灌丛、锦鸡儿灌丛等,零星分布在研究区内;各植被类型下的土壤养分含量分别为:高山嵩草草甸>线叶嵩草草甸>芨芨草草原>紫花针茅草原。

(3) 土壤侵蚀主要发生在地表 0—15 cm,侵蚀量与养分中的 TN,EXT-N 以及 OM 呈显著相关关系。高寒草原草甸土层较薄,养分主要集中在土壤表层,且全量养分中 TN 和 OM 含量最高,速效养分中 EXT-N 含量最高,因此侵蚀发生时以上 3 类养分的流失最为明显。

参考文献:

[1] 王长庭,龙瑞军,王启基,等.高寒草甸不同海拔梯度土壤 OM 氮磷的分布和生产力变化及其与环境因子的关系[J].草业学报,2005,14(4):15-20.

[2] 德科加,张德罡,王伟,等.施肥对高寒草甸植物及土壤 N,P,K 的影响[J].草地学报,2014,22(2):299-305.

[3] 蔡泽江,孙楠,王伯仁,等.长期施肥对红壤 pH、作物产量及氮、磷、钾养分吸收的影响[J].植物营养与肥料学

报,2011,17(1):71-78.

量高寒草原草甸退化程度的重要土壤性状指标。并能敏感反映高寒草原草甸土壤侵蚀强度。随着侵蚀程度的增加,土流失最多的养分为 TN 和 OM。

EXT-N 是 TN 中组成较简单、活性较大的部分,其含量在一定时期内是土壤供肥的标志,它的高低与 OM 和 TN 密切相关^[54-56]。该研究区土壤侵蚀速率与 TN 和 OM 呈($p<0.05$)水平上的负相关关系,说明随着侵蚀程度的增加,土流失最多的养分为 TN 和 OM。

报,2011,17(1):71-78.

[4] 许联芳,王克林,朱捍华,等.桂西北喀斯特移民区土地利用方式对土壤养分的影响[J].应用生态学报,2008,19(5):1013-1018.

[5] 郭旭东,陈利顶,傅伯杰,等.土地利用/土地覆被变化对区域生态环境的影响[J].环境科学进展,1999(6):66-75.

[6] 张继平,张林波,王凤玉,等.井冈山国家级自然保护区森林土壤养分含量的空间变化[J].土壤,2014,46(2):262-268.

[7] 宇万太,马强,赵鑫,等.不同土地利用类型下土壤活性有机碳库的变化[J].生态学杂志,2007,26(12):2013-2016.

[8] 中国科学院.中国植被图集[M].北京:科学出版社,2001.

[9] 周华坤,赵新全,周立,等.青藏高原高寒草甸的植被退化与土壤退化特征研究[J].草业学报,2005,14(3):31-40.

[10] 李绍良,陈有君,关世英,等.土壤退化与草地退化关系的研究[J].干旱区资源与环境,2002,16(1):92-95.

[11] 周云轩,付哲,刘殿伟,等.吉林省西部土壤沙化、盐碱化和草原退化演变的时空过程研究[J].吉林大学学报:地球科学版,2003,33(3):348-354.

[12] 周道玮,岳秀泉,孙刚,等.草原火烧后土壤微生物的变化[J].东北师大学报:自然科学版,1999(1):123-129.

[13] 曹广民,吴琴,李东,等.土壤—牧草氮素供需状况变化对高寒草甸植被演替与草地退化的影响[J].生态学杂志,2004(6):25-28.

[14] 高旭升,田种存,郝学宁,等.三江源区高寒草原草地不同退化程度土壤养分变化[J].青海大学学报:自然科学版,2006,24(5):37-40.

[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] Waterloo M J. Water and Nutrient Dynamics of *Pinus caribaea* Plantation Forests on Former Grassland Soils in Southwest Viti Levu, Fiji[M]. Enschede Nether-

- lands: FEBODR, 2008.
- [17] 吕达仁, 陈佐忠, 陈家宜, 等. 内蒙古半干旱草原土壤植被大气相互作用(IMGRASS)综合研究[J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 295-306.
 - [18] De Deyn G B, Quirk H, Yi Z, et al. Vegetation composition promotes carbon and nitrogen storage in model grassland communities of contrasting soil fertility[J]. *Journal of Ecology*, 2009, 97(5): 864-875.
 - [19] 朱大岗. 华北地区古近纪—新近纪河湖相地层分区及其地层格架厘定[C]// 第十一届全国古地理学及沉积学学术会议论文集. 湖北荆州, 2010.
 - [20] 钟业勋. 不等分经纬线多圆锥投影的设计与解析计算方法[J]. 测绘学报, 1965, 8(3): 210-236.
 - [21] Zhao X C, Qi F H. Automatic image segmentation based on deformable models and pixel affinity statistic[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2000, 19(1): 33-37.
 - [22] 孙久虎, 刘晓萌, 李佑钢, 等. 北运河地区植被覆盖的遥感估算及变化分析[J]. 水土保持研究, 2006, 13(6): 97-99.
 - [23] 牛宝茹. 干旱半干旱地区植被覆盖度遥感信息提取研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2005, 30(1): 27-30.
 - [24] 鲁如坤. 农业化学手册[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
 - [25] 郭旭东, 傅伯杰, 马克明, 等. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特征研究: 以河北省遵化市为例[J]. 应用生态学报, 2000, 1(4): 557-563.
 - [26] 白军红, 余国营, 王国平. 地统计学在湿地土壤养分空间异质性研究中的应用[J]. 农业环境科学学报, 2001, 20(5): 311-314.
 - [27] 张敏, 贺鹏飞, 陈伟强. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异分析[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(3): 53-58.
 - [28] 刘爱利, 王培法, 丁园圆. 地统计学概论[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
 - [29] White J G, Welch R M, Norvell W A. Soil zinc map of the USA using geostatistics and geographic information systems[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61(1): 185-194.
 - [30] 苏姝, 林爱文, 刘庆华. 普通 Kriging 法在空间内插中的运用[J]. 江南大学学报: 自然科学版, 2004, 3(1): 18-21.
 - [31] 岳文泽, 徐建华, 徐丽华. 基于地统计方法的气候要素空间插值研究[J]. 高原气象, 2005, 24(6): 974-980.
 - [32] 马玉军. 兴海盆地子科滩土壤侵蚀强度及空间分布特征[D]. 西宁: 青海师范大学, 2016.
 - [33] 张信宝, D.L. 赫吉特, D.E. 沃林. ^{137}Cs 法测算黄土高原土壤侵蚀速率的初步研究[J]. 地球化学, 1991(3): 212-218.
 - [34] 徐兴奎, 陈红, 张凤. 中国西北地区地表植被覆盖特征的时空变化及影响因子分析[J]. 环境科学, 2007, 28(1): 41-47.
 - [35] 王涛, 徐澜, 胡阳, 等. 陕北无定河流域土壤侵蚀与植被覆盖和降雨关系研究[J]. 水利水电技术, 2017, 48(6): 149-155.
 - [36] 杜峰, 程积民. 植被与水土流失[J]. 草业与畜牧, 1999(2): 6-11.
 - [37] 樊立娟. 荒漠绿洲过渡带斑块植被区土壤水分时空异质性研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.
 - [38] 陈涛, 杨武年, 徐瑶. 那曲地区不同退化程度的草地土壤养分特征分析[J]. 中国农学通报, 2011, 27(9): 227-230.
 - [39] Wang J, Baskaran M, Niedermiller J. Mobility of ^{137}Cs in freshwater lakes: A mass balance and diffusion study of Lake St. Clair, Southeast Michigan, USA[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, 218: 323-342.
 - [40] 王根绪, 程国栋, 沈水平, 等. 土地覆盖变化对高山草甸土壤特性的影响[J]. 科学通报, 2002(23): 1771-1777.
 - [41] 赵琼, 曾德慧. 陆地生态系统磷素循环及其影响因素[J]. 植物生态学报, 2005, 29(1): 153-163.
 - [42] 罗安程, 孙羲. 施肥对红壤中微生物区系和无机磷溶解及有机磷矿化的影响[J]. 土壤通报, 1995(2): 73-75.
 - [43] 刘建玲, 张凤华. 土壤磷素化学行为及影响因素研究进展[J]. 河北农业大学学报, 2000(3): 36-45.
 - [44] 赵振华, 黄巧云, 陈雯莉, 等. 几种低分子量有机酸、磷酸对土壤胶体和矿物吸附酸性磷酸酶的影响[J]. 中国农业科学, 2002, 35(11): 1375-1380.
 - [45] 黄沆, 付崇允, 周德贵, 等. 植物磷吸收的分子机理研究进展[J]. 分子植物育种, 2008, 6(1): 117-122.
 - [46] 解锋, 李颖飞. 土壤中磷的形态及转化的探讨[J]. 杨凌职业技术学院学报, 2011, 10(1): 4-8.
 - [48] 杨兆平, 欧阳华, 徐兴良, 等. 五道梁高寒草原土壤水分和植被盖度空间异质性的地统计分析[J]. 自然资源学报, 2010, 25(3): 426-434.
 - [49] 程励励, 高以信. 草毡寒冻锥形土的有机质组成特征[J]. 土壤通报, 1996, 27(6): 243-244.
 - [50] 苏培玺, 周紫鹃, 侍瑞, 等. 高寒草毡层基本属性与固碳能力沿水分和海拔梯度的变化[J]. 生态学报, 2018, 38(3): 1040-1052.
 - [51] 刘文杰, 陈生云, 胡凤祖, 等. 疏勒河上游土壤磷和钾的分布及其影响因素[J]. 生态学报, 2012, 32(17): 5429-5437.
 - [52] 王洪杰, 李宪文, 史学正, 等. 不同土地利用方式下土壤养分的分布及其与土壤颗粒组成关系[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 44-46, 50.
 - [53] 邵全琴, 肖桐, 刘纪远, 等. 三江源区典型高寒草甸土壤侵蚀的 ^{137}Cs 定量分析[J]. 科学通报, 2011, 56(13): 1019-1025.
 - [54] 张国平. 基于遥感和 GIS 的中国土壤风力侵蚀研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2002.
 - [55] 和继军, 蔡强国, 田磊, 等. 植被措施对土壤保育的作用及其影响因素分析[J]. 土壤通报, 2010, 41(3): 706-710.
 - [56] 韩晓增, 王凤仙, 王凤菊, 等. 长期施用有机肥对黑土肥力及作物产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(1): 66-71.