

Response of Grassland Community and Stoichiometry to Nitrogen and Phosphorus Addition on Micro-Topography in the Hilly Loess Plateau

Zhao Fang^{1,2,3,4,5}

¹Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling Shaanxi

²Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

³Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

⁴Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, the Ministry of Natural Resources, Xi'an Shaanxi

⁵Shaanxi Provincial Land Consolidation Engineering Technology Research Center, Xi'an Shaanxi
Email: shengtai1201@163.com

Received: Oct. 17th, 2019; accepted: Oct. 31st, 2019; published: Nov. 7th, 2019

Abstract

In this study, natural grassland communities in loess hilly areas were taken as the research object, and field-positioned fertilization experiments were conducted to investigate the response of grassland community biomass and the stoichiometric characteristics of leaves and roots to the addition of nitrogen and phosphorus under gradients of different micro-landforms (slope position, slope orientation). The difference is expected to provide reference for vegetation restoration and construction work in the Loess Hilly Region. The results showed that: 1) The aboveground biomass of grassland community showed an increasing trend after two kinds of fertilization treatments. The response degree of aboveground biomass to fertilization treatment was that N + P was added higher than N, part of the micro-terrain of underground biomass decreased in after fertilization treatment, no significant difference in the total biomass of grassland communities in the two fertilization treatments, and fertilization treatments on root vertical distribution pattern had no significant impact. 2) The N content in the leaves of the community increased after two kinds of fertilization. The content of P in the leaves increased on the sunny slope before fertilization, but the trend of the change on the shade was more complicated. The ratio of N/P concentration in leaves was greater than 16 after both treatments, indicating that the P limit of the grassland ecosystem in this area was more significant than that of N restriction. 3) After two fertilization treatments, the content of C in roots did not change much, and the contents of N and P in roots all showed different increasing trends. The change of P content in roots was significantly different ($P < 0.05$). In addition, the root C/N, the ratios of C/P and N/P were all decreased, and the C/P and N/P ratios of the roots were significantly lower in the whole section and in the decline of the shade ($P < 0.05$).

Keywords

Loess Hilly Region, Micro-Landform, Grassland Community, Addition of Nitrogen and Phosphorus, Stoichiometry

氮磷添加对黄土丘陵区微地形梯度下天然草地群落的影响

方昭^{1,2,3,4,5}

¹中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌

²陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 陕西 西安

³陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安

⁴自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 陕西 西安

⁵陕西省土地整治工程技术研究中心, 陕西 西安

Email: shengtai1201@163.com

收稿日期: 2019年10月17日; 录用日期: 2019年10月31日; 发布日期: 2019年11月7日

摘要

本研究以黄土丘陵区天然草地群落为研究对象, 通过建立野外定位施肥试验, 探究不同微地形(坡位、坡向)梯度下草地群落生物量及叶片、根系化学计量特征对氮磷添加的响应差异, 以期为黄土丘陵区植被恢复和建设工作提供借鉴。结果表明: 1) 草地群落在两种施肥处理后地上生物量呈现增加趋势, 地上生物量对施肥处理的响应程度表现为N + P添加高于N添加; 部分微地形地下生物量在施肥处理后出现下降趋势, 草地群落总生物量在两种施肥处理后无显著差异, 而且施肥处理对根系垂直分布格局均没有产生显著影响。2) 群落叶片N含量在两种施肥后均有所增加, 叶片P含量在阳坡较施肥前均有所增加, 但在阴坡变化趋势则较为复杂。两种施肥处理后叶片N/P质量浓度比均大于16, 表明施肥后该区域草地生态系统受P限制较N限制更加明显。3) 两种施肥处理后, 根系C含量变化不大, 根系N、P含量整体均呈现不同的增加趋势, 其中根系P含量变化达到显著差异($P < 0.05$); 另外, 根系C/N、C/P和N/P比均有所降低, 根系C/P和N/P比分别在断面和阴坡下降趋势达到显著差异($P < 0.05$)。

关键词

黄土丘陵区, 微地形尺度, 草地群落, 氮磷添加, 化学计量学特征

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 随着人类活动和工业的快速发展, 以大气 CO₂ 浓度增加、气候变暖和氮沉降增加为标志的

全球变化已经发生[1], 而草地生态系统作为陆地生态系统的重要组成部分, 在应对和缓解全球气候变化方面的作用日益突出[2] [3]。我国草地面积辽阔, 分布广泛, 各类草地面积约 $4 \times 10^8 \text{ hm}^2$ [4], 其中黄土高原地区草地面积可达 $0.6 \times 10^8 \text{ hm}^2$ [5]。草地生物量动态是群落结构和功能的集中体现, 能够反映植被的生长状况和外界环境条件的变化, 同时也是衡量草地退化的重要指标[6] [7]。生态化学计量学作为研究生态过程和作用中多种元素间平衡的学科[8] [9], 其化学计量关系可以表征不同层次生物体自身组分、功能以及环境中元素供给状况的变化[10], 为研究不同尺度下植物养分限制状况及其适应策略提供了有力工具。

黄土丘陵是黄土高原上主要的地貌形态[11], 其地形起伏, 沟壑纵横, 水土流失伴随着大量的养分流失[12], 大大增加了黄土丘陵区植被恢复与重建工作的难度。而施肥作为草地恢复、提高群落生产力的重要措施之一, 近年来才开始在各类草地生态系统开展相关施肥试验[13] [14] [15] [16]。已有部分研究表明施氮肥可以增加草地群落地上生物量, 但对群落地下生物量的影响结果尚不统一[17] [18] [19] [20]; 而施磷肥对草地群落地上生物量的促进作用低于施氮肥的效果, 但施磷肥可以较显著地增加群落地下生物量[21]。另外, 植物叶片和根系碳氮磷等元素含量及其化学计量比均会对氮磷添加产生不同的响应。目前, 以草地群落为研究对象的养分添加试验大多以氮添加为主, 有关磷素添加或者氮磷耦合添加的相关试验较少, 关于微地形梯度下氮磷添加对植被群落生产力及化学计量特征的影响研究则更为少见。因此, 本研究以黄土丘陵区微地形(阳坡坡上、中、下部, 坡顶, 阴坡坡上、中、下部)梯度下的草地群落为研究对象, 研究微地形梯度下草地群落生物量及化学计量特征对不同施肥处理的响应差异, 以期为区域植被恢复建设提供科学参考和借鉴。

2. 材料与方 法

2.1. 研究区概况

研究区位于陕北安塞县真武洞镇中国科学院水土保持研究所安塞综合试验站附近($108.51^\circ \sim 109.26^\circ \text{E}$, $36.30^\circ \sim 37.19^\circ \text{W}$), 属于中纬度温带, 气候类型为暖温带半干旱气候, 年平均气温 8.8°C , 年平均降水量 531.4 mm , 年日照时数为 2395.6 h , 日照百分率达 54% , 全年无霜期为 144 d 。主要土壤类型为黄绵土, 具有土壤质地疏松、土壤肥力低和抗蚀抗冲性能差等特点, 多易造成水土流失。研究区(表 1)主要代表植物有: 白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、中华隐子草(*Cleistogenes Chinensis*)、丛生隐子草(*Cleistogenes caespitosa*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、草木樨状黄耆(*Astragalus melilotoides*)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、芨蒿(*Artemisia giraldii*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、菊叶委陵菜(*Potentilla tanacetifolia*)、二裂委陵菜(*Potentilla bifurca*)等。

2.2. 研究方法

2.2.1. 样地布设和处理

在研究区内选择较为典型的断面, 分别在不同坡位(坡下部、坡中部、坡上部、坡顶部)和坡向(阴坡和阳坡)选取匀质样地进行样地布设(表 1), 每个断面共计 7 个样地, 利用手持 GPS 完成海拔、坡度、坡向等相关属性的调查。每个样地设置 3 个 $1 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 大小的重复单元, 然后将每个小区划分成 3 个 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的小样方, 中间插木条做上标记, 并随机做如下处理(图 1): CK 处理: 无施肥添加; N 处理: 施加氮肥 43.4 g (尿素, 含氮率 46% , 纯氮量 20 g); N + P 处理: 施加氮肥 43.4 g (尿素, 含氮率 46% , 纯氮量 20 g) + 磷肥 21.7 g (过磷酸钙, 含磷率 46% , 纯磷量 10 g)。肥料均分为两等份分两次进行施肥, 第一次施肥时间为 2014 年 8 月, 第二次施肥时间为 2015 年 4 月。为避免施肥对植物产生的负面影响, 施肥工作尽量挑选阴天或小雨天进行, 样品采集时间为 2015 年 8 月中旬。

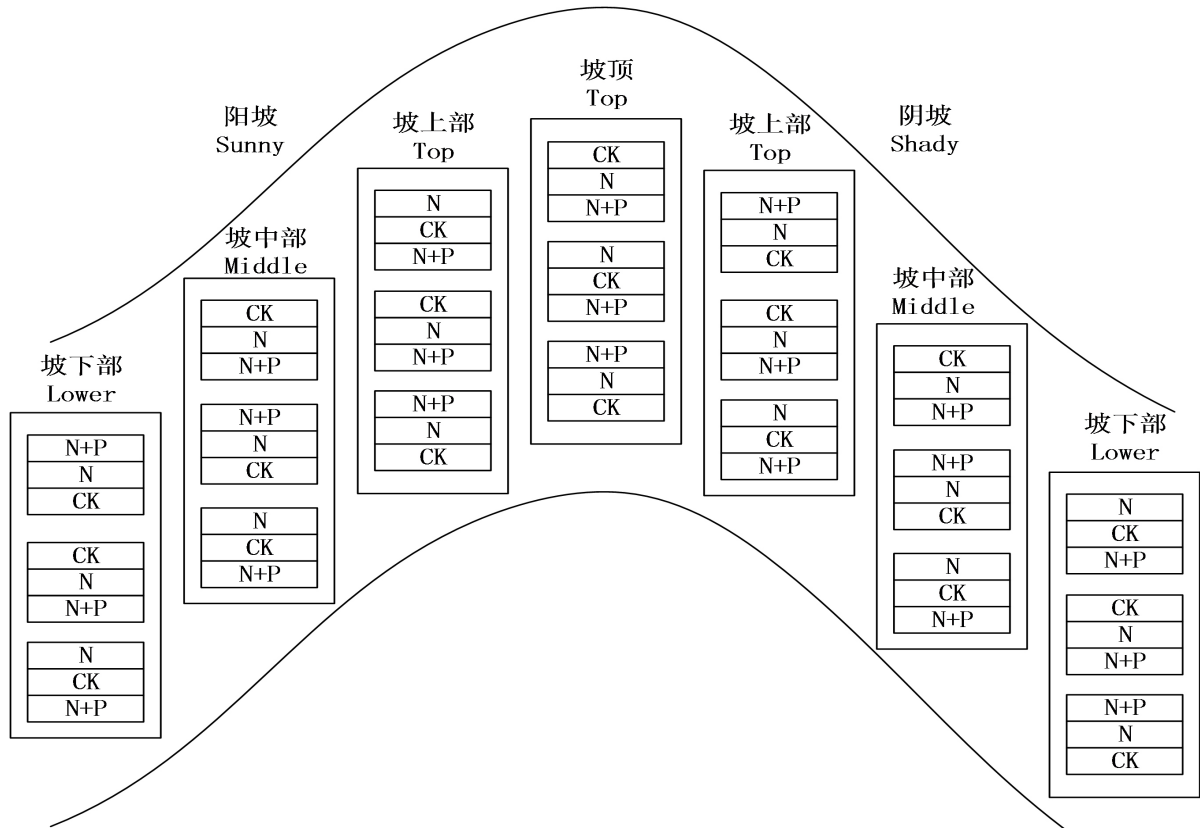


Figure 1. Sample arrangement diagram of study area
图 1. 研究区样方布置图

Table 1. General information of sites
表 1. 样地基本信息

坡向	坡位	海拔	坡度	盖度	群落优势种	群落伴生种
Aspect	Position	Altitude (m)	Grade (°)	Coverage (%)	Dominant species	Companion species
	坡下部 Lower	1187	33	60	白羊草	白羊草
阳坡	坡中部 Middle	1228	26	75	丛生隐子草	白羊草 + 铁杆蒿
Sunny	坡上部 Upper	1286	28	65	菊叶委陵菜	丛生隐子草
	坡顶部 Top	1308	0	70	白羊草	长芒草 + 菊叶委陵菜
	坡上部 Upper	1290	13	70	铁杆蒿	铁杆蒿 + 达乌里胡枝子
阴坡	坡中部 Middle	1274	17	65	铁杆蒿	铁杆蒿 + 长芒草
Shady	坡下部 Lower	1164	15	85	长芒草	丛生隐子草 + 长芒草

各样地植物群落科属种鉴定方法均依据《中国植物志》植物种类特征进行识别和判定。

2.2.2. 地上、地下生物量测定

于 2015 年 8 月中旬对研究区内样方进行群落特征调查和生物量的采集工作。地上生物量采用传统收获法，在每个调查样方内将所有植物从茎基部剪下分物种装入信封带回实验室于 75℃ 烘至恒重后称重。地下生物量采用钻土芯法采集，用内径 9.0 cm 的土钻在样地内随机选取 5 个点进行取样，每个样点分层方法参考张玮[22]等人研究按 0~20、20~50、50~80、80~100 cm 分层钻取，然后置于 0.1 mm 筛网中，用

大量清水反复冲洗, 晾干后于 75℃烘至恒重后称重。地下生物量($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) = 平均每根土芯根系干重(g)/ $[\pi \times (0.09(\text{m}/2)^2)]$ [23]。

2.2.3. 植物叶片和根系化学计量特征测定

对研究区内各个样方, 分物种采集样方内所有植株顶部健康、完整的叶片装入信封, 带回实验室烘干, 粉碎研磨过 100 目筛分别进行元素分析。测定时经浓硫酸-过氧化氢消煮后, 采用重铬酸钾外加热法测定有机碳含量, 用凯氏定氮法测定叶片全氮含量; 用钼蓝比色法测定叶片全 P 含量。植株根部 C、N、P 测定方法同叶片。具体测定方法参照《土壤农化分析》[24]。

2.2.4. 数据处理

本试验中植物叶片化学计量特征研究是基于群落水平上的对比分析, 其叶片 N、P 含量计算时采用群落所有物种叶片养分含量的加权平均值, 权重因子采用各个物种相对生物量[25]。植物根系化学计量特征采用 4 个土层的算术平均值进行比较分析。在数据分析之前, 对各类数据进行正态分布检验, 检验结果均符合正态分布。采用单因素方差分析(One way ANOVA)和 LSD 多重比较(显著性水平选取 $\alpha = 0.05$)对不同坡向、坡位条件下草地群落地上地下生物量及叶片和根系 C、N、P 等化学计量特征差异进行比较分析, 最后采用 Origin9.0 作图。

3. 结果与分析

3.1. 草地群落地上地下生物量对氮磷添加的响应特征

如表 2 所示, 黄土丘陵区微地形条件下草地群落地上生物量变化范围为 119.5~236.4 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 平均值 158.4 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 变异系数为 26.0%; 单独施氮肥处理后地上生物量变化范围为 156.5~278.3 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 平均值 196.8 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 变异系数为 20.8%; 同时施加氮肥+磷肥后草地群落生物量变化范围为 193.4~284.0 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 平均值 228.0 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 变异系数为 13.7%。与未施肥相比, 7 个微地形条件下草地群落在施加氮肥和氮磷耦合添加处理后, 地上生物量均明显增加, 且氮磷耦合添加处理后的群落生物量比单独施 N 肥处理后的群落生物量增加更多。同时, 方差分析表明阳坡坡上部和阴坡坡上部施肥前后的地上生差异显著($P < 0.05$)。不同微地形下草地群落地下生物量变化范围为 581.1~1042.4 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 平均值 731.8 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 变异系数为 22.4%; 单独施氮肥处理后地下生物量变化范围为 527.0~721.4 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 平均值 642.6 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 变异系数为 10.0%; 氮磷耦合添加处理后草地群落地下生物量变化范围为 548.8~966.4 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 平均值 669.4 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 变异系数为 21.4%。可见, 不同微地形条件下草地群落地下生物量对施肥处理呈现出与地上生物量不同的响应规律, 除阴坡坡上部和阴坡坡中部在施肥处理后草地群落地下生物量呈现上升趋势外, 剩余大部分微地形在施肥处理后地下生物量均出现下降趋势。两种施肥处理后地下生物量下降的程度在不同微地形间存在差异, 通过方差分析显示, 只有阳坡坡中、上部和阴坡坡下部在施肥前后的地下生物量达到显著性差异($P < 0.05$)。

Table 2. Grassland community aboveground biomass, belowground biomass and total biomass comparison before and after fertilizing

表 2. 施肥前后草地群落地上生物量(AGB)、地下生物量(BGB)和总生物量对比

坡向	坡位	处理	地下生物量	地上生物量	总生物量
Aspect	Position	Treatment	BGB (g/m^2)	AGB (g/m^2)	Total biomass (g/m^2)
	坡下部 Lower	CK	581.1 ± 5.60a	146.4 ± 12.9a	727.8 ± 22.9a
	坡下部 Lower	N	590.7 ± 37.0a	195.3 ± 2.3a	786.0 ± 36.6a
	坡下部 Lower	NP	548.8 ± 16.0a	237.0 ± 25.1a	785.8 ± 40.9a

Continued

阳坡	坡中部 Middle	CK	822.4 ± 12.6a	158.86 ± 7.47a	981.28 ± 28.39a
Sunny	坡中部 Middle	N	669.8 ± 14.8b	186.3 ± 28.8a	856.1 ± 58.4a
	坡中部 Middle	NP	648.4 ± 3.4b	226.0 ± 21.6a	874.3 ± 32.0a
	坡上部 Upper	CK	778.6 ± 10.4a	135.1 ± 12.3b	913.6 ± 28.3a
	坡上部 Upper	N	677.0 ± 14.5b	165.3 ± 2.5a	842.3 ± 42.4a
	坡上部 Upper	NP	600.2 ± 5.2c	202.6 ± 6.4a	802.8 ± 17.7a
	坡顶部 Top	CK	593.7 ± 5.1a	119.5 ± 18.6a	713.1 ± 41.5a
	坡顶部 Top	N	527.0 ± 10.3a	156.5 ± 6.2a	683.5 ± 32.6a
	坡顶部 Top	NP	551.9 ± 13.4a	193.4 ± 29.6a	745.3 ± 49.0a
	坡上部 Upper	CK	653.0 ± 5.5a	125.9 ± 8.0b	778.9 ± 22.9a
	坡上部 Upper	N	656.3 ± 1.5a	179.8 ± 30.2a	836.0 ± 45.3a
	坡上部 Upper	NP	667.9 ± 14.2a	206.3 ± 2.5a	874.3 ± 18.2a
	阴坡	坡中部 Middle	CK	651.5 ± 5.7a	186.9 ± 17.9a
Shady	坡中部 Middle	N	655.7 ± 29.4a	215.9 ± 17.2a	871.6 ± 34.5a
	坡中部 Middle	NP	702.0 ± 6.9a	246.6 ± 12.9a	948.6 ± 28.3a
	坡下部 Lower	CK	1042.4 ± 6.9a	236.4 ± 10.2a	1278.7 ± 51.9a
	坡下部 Lower	N	721.4 ± 12.6b	278.3 ± 13.7a	999.7 ± 33.6b
	坡下部 Lower	NP	966.4 ± 2.8a	284.0 ± 25.9a	1250.4 ± 40.7a

每一栏同列数据后不同字母表示差异显著达 5% 显著水平。

3.2. 草地群落地下生物量分布对氮磷添加的响应

在黄土丘陵沟壑区, 植物生长受水分限制作用明显, 为获取更多水分植物根系多数分布较深, 主要集中分布在 0~50 cm 土层内。从根系生物量的分布特征(图 2)可以看出, 地下生物量均表现出随土层深度增加而逐渐减少的变化趋势。在本研究中, 7 个微地形条件下对照样方草地群落 0~50 cm 地下生物量平均占总地下生物量的 60.8%, 62.3%, 68.0%, 67.8%, 62.6%, 65.9% 和 61.8%。氮处理后, 除阳坡上部和坡顶小幅下降外, 其他微地形下 0~50 cm 生物量均有所上升, 但均未达到显著水平($P > 0.05$)。氮磷耦合添加处理后草地群落 0~50 cm 地下生物量在坡顶处、阴坡上部和阴坡中部有所下降, 其余均表现为小幅上升, 但也未达到显著水平($P > 0.05$)。另外, 50~80 cm 和 80~100 cm 土层根系分布较少, 对施肥措施响应也不大敏感。总体而言, 两种施肥处理对于黄土丘陵区微地形下草地群落植物根系的垂直分布格局并没有产生显著影响。

3.3. 草地群落叶片 N、P 化学计量特征对氮磷添加的响应特征

黄土丘陵区微地形下草地群落植物叶片 N、P 含量及 N/P 比平均值分别为 24.8, 1.61 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 16.8 (图 3)。试验表明, 单一施氮肥后草地群落植物叶片 N、P 含量及 N/P 比平均值分别为 29.0, 1.50 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 19.2, 氮磷耦合添加处理后, 植被群落叶片 N、P 含量及 N/P 比平均值分别为 31.3, 1.95 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 16.3。群落叶片 N 含量在施加氮肥和氮磷耦合添加后均有增加趋势, 且氮磷耦合添加处理后叶片 N 含量比单独施氮肥增加趋势更为明显。另外, 方差分析结果显示, 施肥前后叶片 N 含量只在坡顶处达到显著差异, 其他几种微地形条件下施肥前后叶片 N 含量变化均未达到显著差异($P < 0.05$)。两种施肥处理后叶片 P 含量在阳坡较施肥前均有所增加, 但在阴坡施肥后叶片 P 含量变化趋势则较为复杂。单一施氮肥后, N/P

比较未施肥处理增加了 14.2%，而氮磷耦合添加处理后，N/P 比较未施肥处理下降了 3.44%。

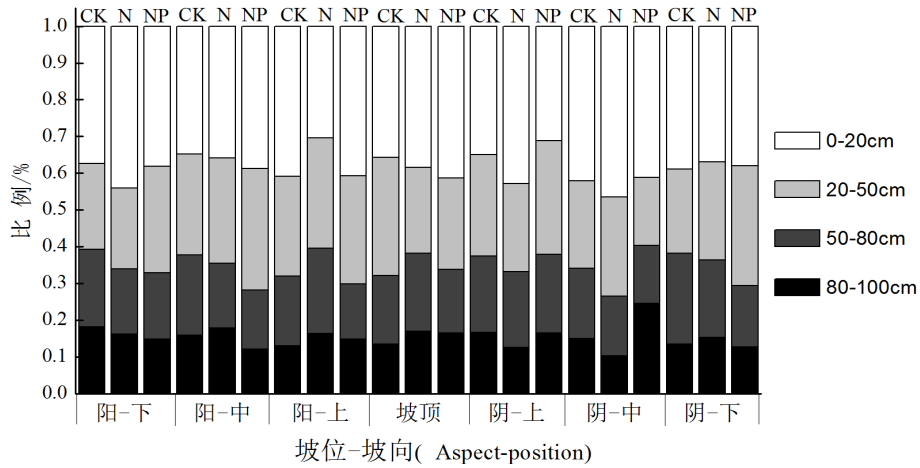


Figure 2. Distribution of underground biomass in various micro-topography under different fertilization treatment

图 2. 不同施肥处理下各微地形地下生物量分配

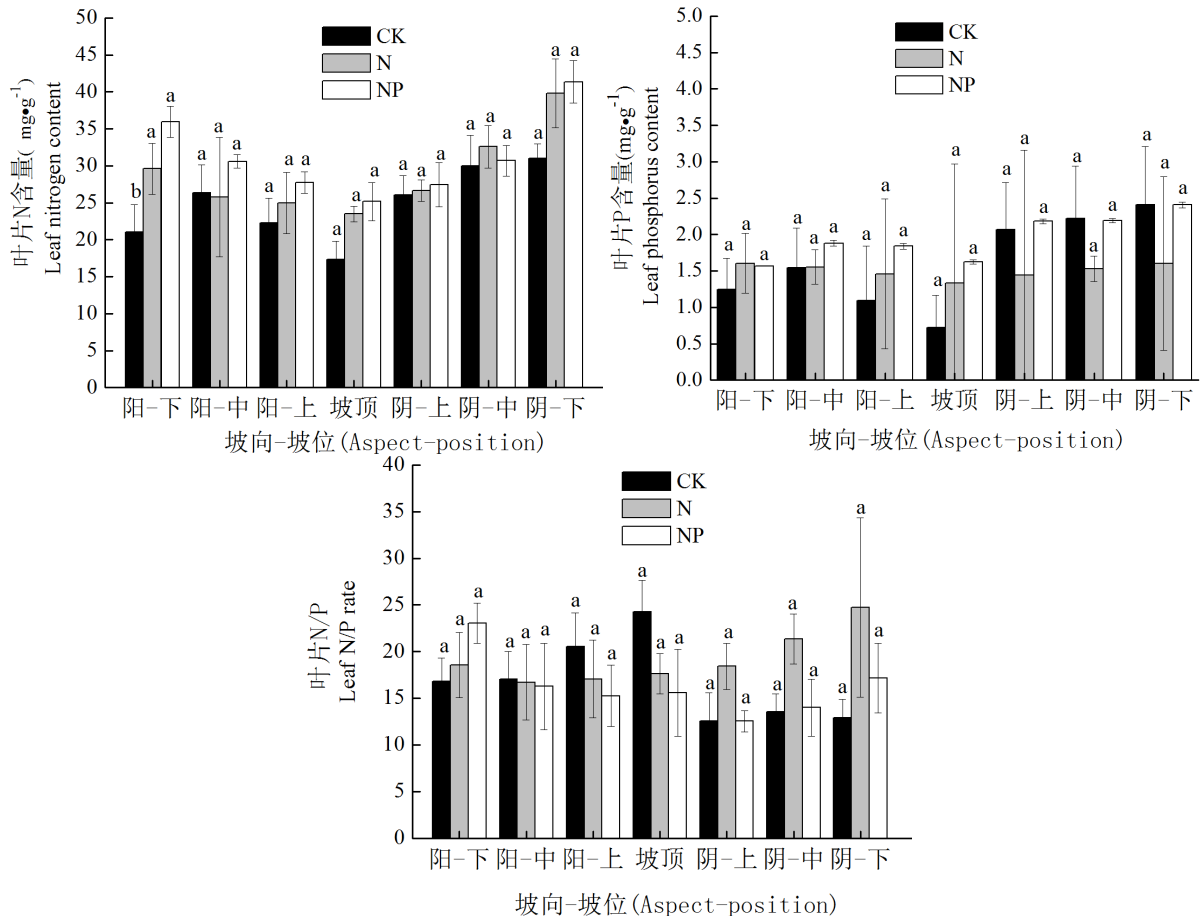


Figure 3. Leaf stoichiometric characteristics before and after fertilizing (Mean ± SE). Different letters represent significant differences between different fertilization treatments under the same micro-topography ($P < 0.05$)

图 3. 施肥前后叶片化学计量特征差异比较(平均值 ± 标准误)。不同字母代表在相同微地形条件下不同施肥处理之间差异显著($P < 0.05$)

3.4. 草地群落根系化学计量特征对氮磷添加的响应特征

目前，关于黄土丘陵区根系养分状况对不同施肥处理的响应研究较少。本试验结果显示，不同微地形下草地群落在施肥处理后，根系养分含量及其化学计量特征比均发生了改变。如图 4 所示，根系 C 含

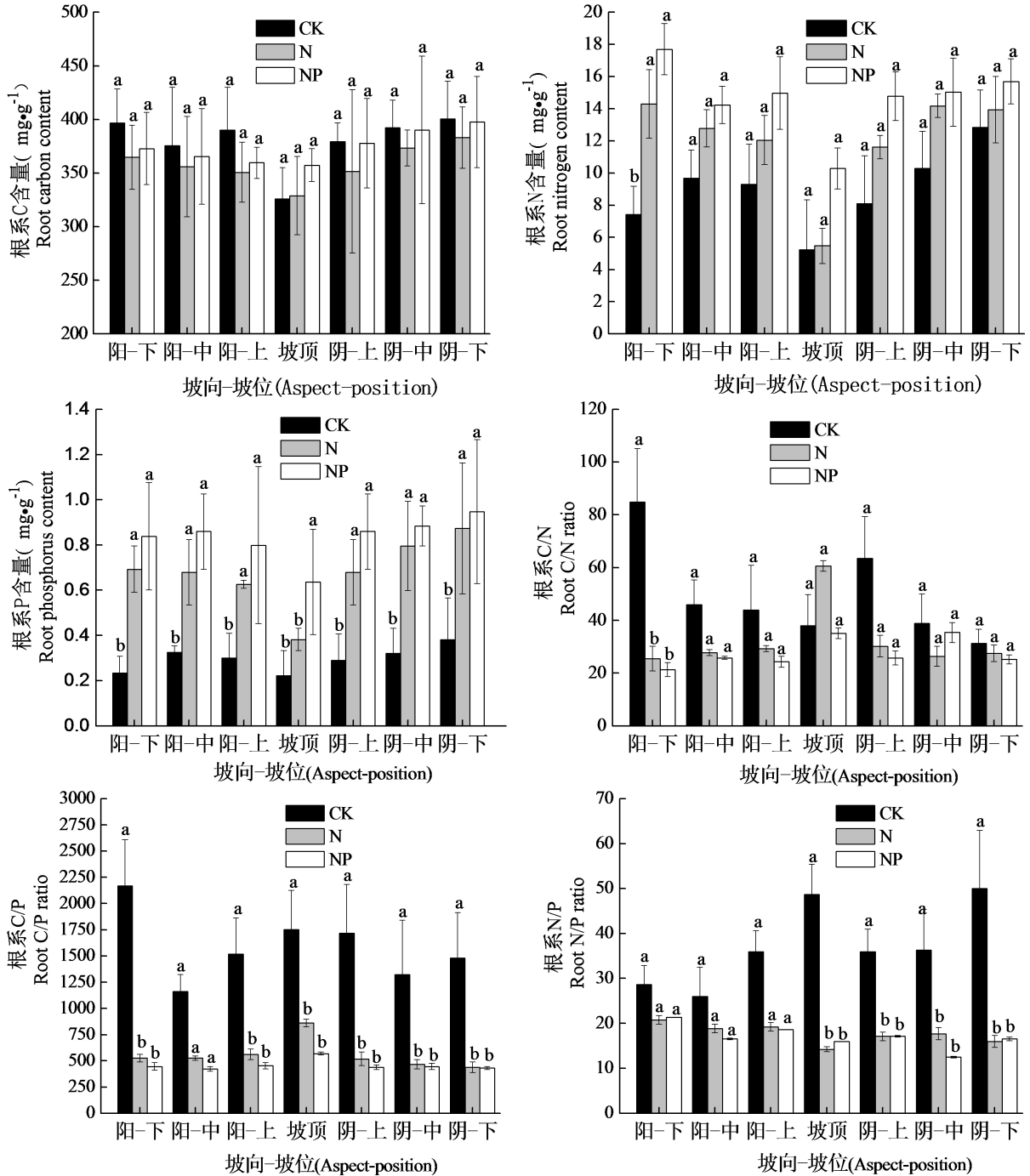


Figure 4. Root stoichiometric characteristics before and after fertilizing (Mean ± SE). Different letters represent significant differences between different fertilization treatments under the same micro-topography ($P < 0.05$)

图 4. 施肥前后根系化学计量特征差异比较(平均值 ± 标准误)。不同字母代表在相同微地形条件下不同施肥处理之间差异显著($P < 0.05$)

量在施肥前后无太大明显变化。根系 N 含量和 P 含量对两种施肥措施的响应程度整体均呈现不同的增加趋势, 根系 N 含量在两种施肥措施后与未施肥相比较差异都不显著, 然而根系 P 含量在两种施肥处理后较未施肥相比均达到显著差异($P < 0.05$)。施氮肥处理后断面根系平均磷含量为施肥前根系 P 含量的 2.30 倍, 氮磷耦合添加处理后根系平均 P 含量为施肥前的 2.80 倍左右。根系 C/N 比在施肥处理后有所降低, 但降低幅度不大。根系 C/P 比在施肥后明显降低, 且方差分析表明除阳坡中部外, 其他各微地形下根系 C/P 比在施肥前后差异显著($P < 0.05$)。两种施肥处理后根系 N/P 比在阳坡下降趋势未达到显著差异, 但在阴坡下降趋势均达到显著差异($P < 0.05$)。施加氮肥后断面根系 N/P 平均值为 17.6, 氮磷耦合添加处理后根系 N/P 平均值为 16.9, 比未施肥(37.3)显著降低很多。

4. 讨论

4.1. 微地形梯度下氮磷添加对草地群落生物量的影响

生物量作为多种环境因子综合作用的结果, 其动态变化通常与水热因子、土壤养分状况等环境因子息息相关, 关系密切。而坡向和坡位作为黄土丘陵区重要的微地形因子, 影响着草地群落的结构和组成。本文研究表明, 微地形条件下群落地上、地下生物量从阳坡坡下部到阴坡坡下部的变化趋势基本一致, 二者都在坡顶处最小, 阴坡坡下部最大, 生物量随断面微地形变化整体呈现“V”型变化趋势。草地群落地上、地下生物量均在坡顶处最小, 主要是由于坡顶处土壤腐殖质层较薄, 加之受人为活动干扰较大, 从而制约了植被的生长发育[26]。坡位通常会影响到土壤养分和水分资源的空间再分配, 使得土壤养分和水分多在坡下部富集[27], 从而导致坡顶部和坡上部的群落生物量要低于坡中、下部。对各微地形梯度下草地群落进行两种施肥处理后, 草地群落地上生物量均呈现增加趋势, 但与对照相比多数未达到显著差异; 且氮磷耦合添加比单独氮添加群落生物量增加趋势大, 说明该区域草地生态系统可能受 N 和 P 的共同限制作用较为明显。然而, 7 种微地形梯度下草地群落地下生物量对两种施肥措施整体呈现下降趋势(除阴坡坡上部和阴坡坡中部), 这主要是因为随着 N、P 的添加, 坡面上以根系宿生为主的多年生优势草本植物根系养分吸收能力逐渐过剩, 将更多的资源分配给地上部分, 植物由对地下养分的竞争逐渐转化为对地上光资源的竞争, 使植株获得更多的光照资源[28] [29]。Müller [29]等也认为在养分条件较好时, 群落植物倾向于将较多的生物量投资于地上部分的生长, 在养分条件较差时则倾向于分配至地下部分, 促进根系生长以提高群落在不利生境中对养分资源的利用率。

4.2. 微地形梯度下养分添加对草地群落根系垂直分布的影响

草地群落地下根系作为连接地上部分和地下过程的重要纽带[30], 正确认识其垂直分布规律以及对外源氮磷添加的响应特征, 对于预测未来草地生态系统碳汇功能和减缓全球气候变化具有重要作用。大多数以往的研究表明, 施肥不仅会改变植物地上地下生物量的分配还可能影响植物根系的分布格局[31] [32]。本研究中, 两种施肥措施并没有显著改变微地形下草地群落地下生物量垂直分布格局, 这与樊维[33]等研究结果相一致。两种施肥处理后大部分微地形草地群落 0~50 cm 地下生物量相较于未施肥样方表现为小幅上升, 一方面可能是氮添加处理后, 改变了土壤养分限制状况, 促使植物根系侧根生长, 导致植物地下根系在土层中的分布变浅[32]; 另一方面, 也可能是因为植物根系垂直分布更多地取决于其他环境条件, 特别是对水分的吸收[34]。因此, 关于养分添加试验对草地群落地下根系垂直分布的影响也应更多地关注年际间的差异变化。

4.3. 微地形梯度下氮磷添加对草地群落叶片及根系化学计量特征的影响

本研究结果显示, 不同微地形条件下对对照样方草地群落叶片平均 N、P 和 N/P 平均值分别为 24.8、

1.61 g/kg, 16.8, 与郑淑霞等[35]对黄土高原地区植物叶片 N、P 含量及 N/P (24.1, 1.6 g/kg, 15.1)的研究结果基本一致。经两种施肥处理后不同微地形下草地群落叶片 N 含量均有所增加, 叶片 P 含量在阳坡较施肥前均有所增加, 但在阴坡施肥后叶片 P 含量变化趋势则较为复杂, 这可能是因为阳面草地群落优势物种以禾本科为主, 阴坡多以菊科为主。研究发现菊科植物对 P 较为敏感, 而禾本科植物对 N 较为敏感[36], 故造成阴坡施氮处理后群落叶片 P 含量较未施肥有所降低。大多数研究通常以植物叶片 N:P 比作为判断 N 限制或 P 限制的重要指标[37] [38]。不同微地形下草地群落叶片 N/P 比在单独施氮和氮磷耦合添加处理后分别为 19.2 和 16.3, 均大于 16.0, 表明施肥后该地区植物生长仍然受 P 限制。根系 N 含量和 P 含量在两种施肥处理后整体均呈现不同的增加趋势, 其中根系 P 含量在两种施肥处理后较未施肥相比达到显著差异($P < 0.05$)。类似地, 植物根系等其它器官 N/P 比也可以反映养分限制状况[39] [40]。不同微地形草地群落根系 N/P 在两种施肥措施后较未施肥群落均明显下降, 其中阴面微地形草地群落根系 N/P 下降水平达到显著性差异($P < 0.05$), 从根系化学计量特征的变化方面进一步印证了该研究区域受到 P 限制作用较 N 限制作用更加明显, 而且 N 的添加会加大这种 P 限制的程度。

参考文献

- [1] 徐冠华, 葛全胜, 宫鹏, 等. 全球变化和人类可持续发展: 挑战与对策[J]. 科学通报, 2013,58(21): 2100-2106.
- [2] Jmo, S., Johnson, K. and Olson, R.J. (2002) Estimating Net Primary Productivity from Grassland Biomass Dynamics Measurements. *Global Change Biology*, **8**, 736-753. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00512.x>
- [3] 高清竹. 草地生态系统在应对全球气候变化中的作用[C]//中国草原可持续发展论坛. 2011 中国草原可持续发展论坛论文集. 北京: 农业部草原监理中心, 2011: 110-115.
- [4] Xiao, S.-S., Dong, Y.-S., Qi, Y.-C., et al. (2009) Advance in Responses of Soil Organic Carbon Pool of Grassland Ecosystem to Human Effects and Global Changes. *Advances in Earth Science*, **24**, 1138-1148.
- [5] 张文辉, 刘国彬. 黄土高原植被恢复与建设策略[J]. 中国水土保持, 2009(1): 24-27.
- [6] 郝文芳, 陈存根, 梁宗锁, 等. 植被生物量的研究进展[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(2): 175-182.
- [7] 张彩琴, 张军, 李茜若. 草地植被生物量动态研究视角与研究方法评述[J]. 生态学杂志, 2015, 34(4): 1143-1151.
- [8] Sterner, R.W. and Elser, J.J. (2002) Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere. Princeton University Press, Princeton, 225-226. <https://doi.org/10.1515/9781400885695>
- [9] Hessen, D.O. and Elser, J.J. (2005) Elements of Ecology and Evolution. *Oikos*, **109**, 3-5. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2005.14055.x>
- [10] 于贵瑞, 李轩然, 赵宁, 等. 生态化学计量学在陆地生态系统碳-氮-水耦合循环理论体系中作用初探[J]. 第四纪研究, 2014, 34(4): 201-210.
- [11] 张寅. 黄土丘陵地貌景观定量研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西北大学, 2012.
- [12] 李松. 土壤养分与泥沙流失的初步试验分析[J]. 人民黄河, 1990(2): 64-67.
- [13] 郭永盛, 李鲁华, 危常州, 等. 施氮肥对新疆荒漠草原生物量和土壤酶活性的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(S1): 249-256.
- [14] 何利元, 郭群, 李胜功, 等. 氮磷添加对内蒙古温带草地地上生物量的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2291-2297.
- [15] 李禄军, 曾德慧, 等. 氮素添加对科尔沁沙质草地物种多样性和生产力的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(8): 1838-1844.
- [16] 潘庆民, 白永飞, 韩兴国, 等. 氮素对内蒙古典型草原羊草种群的影响[J]. 植物生态学报, 2005, 29(2): 311-317.
- [17] 祁瑜, 黄永梅, 王艳, 等. 施氮对几种草地植物生物量及其分配的影响[J]. 生态学报, 2010, 31(18): 5121-5129.
- [18] 白雪, 程军回, 郑淑霞, 等. 典型草原建群种羊草对氮磷添加的生理生态响应[J]. 植物生态学报, 2014, 38(2): 103-115.
- [19] 杨晓霞, 任飞, 周华坤, 等. 青藏高原高寒草甸植物群落生物量对氮、磷添加的响应[J]. 植物生态学报, 2014, 38(2): 159-166.

- [20] Li, J.-Z., Lin, S., Taube, F., *et al.* (2011) Above and Belowground Net Primary Productivity of Grassland Influenced by Supplemental Water and Nitrogen in Inner Mongolia. *Plant & Soil*, **340**, 253-264. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0612-y>
- [21] 张彦东, 沈有信, 刘文耀. 金沙江干旱河谷退化草地群落对氮磷施肥的反应[J]. 植物研究, 2004, 24(1): 59-64.
- [22] 张祎, 任宗萍, 李鹏, 等. 黄土丘陵区小流域生态恢复对土壤有机碳和全氮的影响[J]. 水土保持学报, 2018(1): 97-103.
- [23] 邓强, 李婷, 袁志友, 焦峰. 黄土高原 4 种植被类型的细根生物量和年生产量[J]. 应用生态学报, 2014, 25(11): 3091-3098.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [25] 丁小慧, 罗淑政, 刘金巍, 等. 呼伦贝尔草地植物群落与土壤化学计量学特征沿经度梯度变化[J]. 生态学报, 2012, 32(11): 3467-3476.
- [26] 张娜, 梁一民. 黄土丘陵区天然草地地下/地上生物量的研究[J]. 草业学报, 2002, 11(2): 72-78.
- [27] Gilbertc, S., Samuelw, C., Joseph, A., *et al.* (2011) Spatial Distribution of Soil Phosphorus and Herbage Mass in Beef Cattle Pastures: Effects of Slope Aspect and Slope Position. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **89**, 59-70. <https://doi.org/10.1007/s10705-010-9376-2>
- [28] Lan, Z.-C. and Bai, Y.-F. (2012) Testing Mechanisms of N-Enrichment-Induced Species Loss in a Semiarid Inner Mongolia Grassland: Critical Thresholds and Implications for Long-Term Ecosystem Responses. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **367**, 3125. <https://doi.org/10.1098/rstb.2011.0352>
- [29] Müller, I., Schmid, B. and Weiner, J. (2000) The Effect of Nutrient Availability on Biomass Allocation Patterns in 27 Species of Herbaceous Plants. *Perspectives in Plant Ecology Evolution & Systematics*, **3**, 115-127. <https://doi.org/10.1078/1433-8319-00007>
- [30] Scurlock, J.M.O., Johnson, K. and Olson, R.J. (2002) Estimating Net Primary Productivity from Grassland Biomass Dynamics Measurements. *Global Change Biology*, **8**, 736-753. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00512.x>
- [31] Zerihun, A. and Montagu, K.D. (2004) Belowground to Aboveground Biomass Ratio and Vertical Root Distribution Responses of Mature *Pinus radiata* Stands to Phosphorus Fertilization at Planting. *Canadian Journal of Forest Research*, **34**, 1883-1894. <https://doi.org/10.1139/x04-069>
- [32] Persson, H., Ahlstrom, K. and Clemenssonlindell, A. (1998) Nitrogen Addition and Removal at Gardsjon—Effects on Fine-Root Growth and Fine-Root Chemistry. *Forest Ecology & Management*, **101**, 199-205. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00136-9](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00136-9)
- [33] 樊维, 蒙荣, 陈全胜, 等. 不同施氮水平对克氏针茅草原上地下生物量分配的影响[J]. 畜牧与饲料科学, 2010, 31(2): 74-76.
- [34] Jackson, R.B., Canadell, J., Ehleringer, J.R., *et al.* (1996) A Global Analysis of Root Distributions for Terrestrial Biomes. *Oecologia*, **108**, 389. <https://doi.org/10.1007/BF00333714>
- [35] Zheng, S.-X. and Shangguan, Z.-P. (2007) Spatial Patterns of Leaf Nutrient Traits of the Plants in the Loess Plateau of China. *Trees*, **21**, 357-370. <https://doi.org/10.1007/s00468-007-0129-z>
- [36] 沈艳, 谢应忠, 甄研, 等. 不同恢复措施对典型草原优势植物碳、氮、磷化学计量特征的影响[J]. 农业科学研究, 2013(3): 5-9.
- [37] Güsewell, S. (2004) N:P Ratios in Terrestrial Plants: Variation and Functional Significance. *New Phytologist*, **164**, 243-266. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01192.x>
- [38] Chen, Y.-H., Han, W.-X., Tang, L.-Y., *et al.* (2013) Leaf Nitrogen and Phosphorus Concentrations of Woody Plants Differ in Responses to Climate, Soil and Plant Growth Form. *Ecography*, **36**, 178-184. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2011.06833.x>
- [39] Dj, T.J.R. (2003) Use of Nitrogen to Phosphorus Ratios in Plant Tissue as an Indicator of Nutrient Limitation and Nitrogen Saturation. *Journal of Applied Ecology*, **40**, 523-534. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.2003.00820.x>
- [40] Alvarezclare, S. and Mack, M.C. (2015) Do Foliar, Litter, and Root Nitrogen and Phosphorus Concentrations Reflect Nutrient Limitation in a Lowland Tropical Wet Forest? *PLoS ONE*, **10**, e123796. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0123796>