

李维军. 黄土高原斯泰普草原植物氮磷生态化学计量特征对氮素添加的响应[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(3): 208–213.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.03.050

黄土高原斯泰普草原植物氮磷生态化学 计量特征对氮素添加的响应

李维军

(宁夏云雾山国家级自然保护区管理局, 宁夏固原 756000)

摘要:以宁夏云雾山国家级自然保护区斯泰普草原为研究对象,测定了不同施肥梯度植物叶片和根系的全 N、全 P 含量,阐明了不同施肥梯度植物 N、P 生态化学计量特征,可为天然草原的保护和适应性管理提供理论依据。结果表明:(1)随着氮素添加浓度的增加,叶氮含量和氮磷比表现为先增加后降低的趋势,叶磷含量相对稳定;(2)不同优势种和功能群叶氮磷化学计量特征在不同氮素添加浓度中变化趋势差异明显,莎草和禾草叶片氮磷含量较低,豆科植物氮磷含量较高,且磷含量对氮素添加的响应比氮含量弱;(3)各土层(0~30 cm)根氮含量表现为随着氮素浓度的升高而逐步增加,根磷含量表现为先增加后降低的趋势。因此,低浓度氮素添加缓解了氮素限制,高浓度氮素添加加剧了磷元素的限制。

关键词:斯泰普草原;叶氮含量;叶磷含量;化学计量特征;施肥

中图分类号: S181 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)03-0208-05

我国的各类草地有 4 亿 hm^2 , 占国土面积的 41.7%, 其中大部分分布在北方, 是我国主要的草业生产基础和重要的生态安全屏障。然而, 受气候变化(增温、氮沉降、降雨变异的增强等)和人类活动(放牧、土地利用方式转变等)的综合影响, 我国草地约有 90% 以上的面积出现不同程度的退化, 导致生产和生态功能严重下降^[1]。从上世纪末开始, 我国针对草地退化、草业发展效益低下等难题, 制定和实施了一系列生态恢复工程 and 政策措施, 目前草地严重退化现象已初步得到遏制, 但“局部改善, 整体退化”的态势并未得到有效改观, 生态赤字逐渐扩大。

黄土高原的草地面积为 $2.32 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 占其土地总面积的 33%^[2], 其中以长芒草(*Stipa bungeana*)为建群种的斯泰普草原为主体, 占黄土高原草地面积的 60%, 在维持区域生态平衡、调节气候以及保持水土等方面占有重要地位^[3]。深入研究长芒草原恢复管理过程中植物生态化学计量特征, 对于改善脆弱的黄土区生态系统功能以及实施生态文明、乡村振兴以及美丽中国战略构想具有重要科学意义, 同时可为脆弱生态系统植被措施的选取和效益评价提供科学依据和实践指导。

生态化学计量学(ecological stoichiometry)是结合了生物学、化学和物理学等基本原理, 研究生物系统能量平衡和多重化学元素(主要是 C、N、P)平衡的科学^[4]。近年来, 生态化学计量学在全球与区域、生态系统、群落、种群、个体、器官水平等不同尺度展开了大量的研究^[5]。氮磷生态化学计量常被

用来诊断植物个体、群落和生态系统的养分限制格局^[6-7]。也有研究表明, 群落中优势种的化学计量学特征对物种更替以及群落演替方向有一定的指示作用^[8]。

鉴于此, 本研究以宁夏云雾山自然保护区斯泰普草原为研究对象, 分析了群落中优势物种、功能群以及根系生态化学计量特征对氮素添加的响应, 研究结果有助于揭示黄土高原斯泰普草原养分限制状况和适应策略, 可为不同时空尺度生态化学计量研究以及黄土高原天然草地的后续合理利用和草食畜牧业的发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

研究地位于宁夏固原市东北部的云雾山国家级草原自然保护区实验区($106^{\circ}21' \sim 106^{\circ}27'E$, $36^{\circ}10' \sim 36^{\circ}17'N$), 海拔高度 1 800~2 100 m。该区域气候属中温带半干旱区, 年平均气温 5°C , 最冷月 1 月(平均气温 -14°C), 最热月 7 月($22 \sim 25^{\circ}\text{C}$), $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的积温为 $2\,370 \sim 2\,882^{\circ}\text{C}$, 年日照时数为 2 500 h, 年降水量 400~450 mm, 降雨季节分配不均, 全年 65%~75% 的降水集中在 7—9 月份。蒸发量 1 330~1 640 mm, 干燥度 1.5~2.1, 无霜期 112~140 d。灾害性天气主要有干旱、暴雨、霜冻、冰雹、干热风等。

保护区植被类型属温带斯泰普草原, 其建群种和优势种以长芒草(*Stipa bungeana*)、百里香(*Thymus mongolicus*)、白莲蒿(*Artemisia sacrorum*)、大针茅(*Stipa grandis*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)群落为主, 伴生种类型以猪毛蒿(*Artemisia scoparis*)、百里香(*Thymus mongolicus*)、星毛委陵菜(*Comarum acaulis*)群落为主, 其中丛生禾本科植物长芒草在该区分布范围最广。

1.2 试验设计

试验选取长期封育(30 年)的斯泰普草原为研究对象, 自

收稿日期: 2018-06-29

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 41601586); 宁夏自然科学基金(编号: NZ10221)。

作者简介: 李维军(1972—), 男, 宁夏固原人, 高级畜牧师, 主要从事草地管理和生物多样性保护方面的研究。E-mail: lwjyws@126.com。

2013 年起采用随机区组设计进行长期氮素添加试验。以尿素作为肥料,5 个尿素添加水平依次为:CK,0 g/(m²·年);N5,5 g/(m²·年);N10,10 g/(m²·年);N20,20 g/(m²·年);N40,40 g/(m²·年),等价于氮素分别为 0、2.34、4.67、9.34、18.68 g/(m²·年),每个水平 8 个重复,每块样地上设置 40 个 6 m×10 m 小区,其中一半(3 m×10 m)用于群落调查,一半(3 m×10 m)用于植物个体采样,各区间有 2 m 缓冲带,于生长季初即每年 4 月底施肥,为提高肥料利用率于小雨天施肥,并按试验设计的施用量用手均匀撒施。

1.3 群落调查和植物氮、磷化学计量测定

在植物生长旺盛期(2017 年 8 月 20 日),于每个 3 m×10 m 的群落调查小区内中随机选取 1 个 1 m×1 m 的样方,用群落学调查的常规方法调查分析群落中的物种组成,包括物种数目、植株高度、各物种多度及盖度、用收获法测定地上总生物量,表征生态系统功能,并按物种分类,带回实验室 80 ℃ 烘干至恒质量。

在每个重复小区内,采集每个物种的 10 株成熟、完整、发育正常、无病虫害的个体的地上部分(不足 10 株的植物种类不予采集),装入塑封袋带回。在每个植株的中部各选取 2 片成熟、展开、无病虫害的叶子。

为减少对样地的破坏,采取根钻法(直径 9 cm)分层取样,土层为 0~10、10~20、20~30 cm,每个处理 8 个重复,土芯编号后带回实验室。用流水漂洗土样,过孔径 0.2 mm 的网筛,得到各层的根系样品,将洗净的根系,在 80 ℃ 烘箱内烘干至恒质量,粉碎测定根系氮、磷养分含量。

叶氮含量(leaf nitrogen concentration, LNC)和根氮含量(root nitrogen concentration, RNC)采用凯氏定氮法^[9]进行测定;叶磷含量(leaf phosphorus concentration, LPC)和根磷含量(root phosphorus concentration, RPC),采用钼锑抗比色法^[9]测定。

1.4 数据分析

利用 Microsoft Excel 2007 和 R 3.3.1 整理计算、分析数据及作图。采用 One-way ANOVA 和 Tukey 法进行显著性检验和多重比较。

2 结果与分析

2.1 优势种氮磷化学计量变化特征

物种重要值>10%为视为优势种^[10],故本研究选取阿尔泰狗娃花、白莲蒿、甘菊、甘青针茅、大针茅、干生苔草、青海苜蓿和百里香等 8 种植物作为不同氮素添加水平的优势种来分析化学计量特征的变化。由表 1 可知,叶片平均氮含量在施加氮肥后显著提高,随着氮素浓度的升高表现为先增加后降低的趋势,N10 和 N40 叶片氮含量差异不显著。相比未施肥样地,N20 水平下叶片平均氮含量提高了 30.29%。随氮素添加浓度不断增加,叶片平均磷含量变化较小,没有显著性差异,在 N10 和 N20 水平下较低,在 N40 水平下达到最高。叶片氮:磷的平均值在不同氮素添加水平下变化特征与叶片氮含量相似,在 N20 水平下达到峰值,由 13.95 增加到 19.37,提高了 38.94%。

图 1 显示,不同物种间氮磷化学计量在氮素添加后变化特征存在差异。图 1-A 表明,甘青针茅、大针茅和干生苔草

叶片氮含量较低,在 N0 水平含量最低,分别为 13.07、13.01、11.13 g/kg。青海苜蓿叶片氮含量最高,在 N0 水平下高达 25.85 g/kg。随着氮素添加水平的提高,甘菊、甘青针茅、大针茅和百里香叶片氮含量呈现先增加后降低的趋势,在 N20 水平最高;干生苔草和青海苜蓿则表现为持续增加的趋势。白莲蒿和青海苜蓿在不同氮素添加水平之间差异不显著。由图 1-B 可以看出,青海苜蓿的叶片磷含量最高,随着氮素添加浓度的增加不断降低,添加尿素 40 g/m² 后,叶片磷含量降低了 25.52%。甘菊叶片在低氮水平下磷含量较高,而甘青针茅在高氮水平下磷含量较高。百里香、干生苔草和大针茅叶片磷含量在不同氮素添加水平之间并没有显著差异。图 1-C 表明,各优势种的氮磷比在低氮水平下大部分较低(小于 14),但随着氮素添加水平的提高,不同优势种氮磷比值变化趋势不同。干生苔草、甘菊和青海苜蓿表现为持续增加的变化规律,其中青海苜蓿氮磷比最高,高达 25.30。其他优势种叶片氮磷比呈现先升高后降低的趋势,在中氮水平比值较高。

表 1 不同氮素添加水平氮、磷和氮:磷变化特征

处理	叶片平均含量(g/kg)		氮:磷
	氮	磷	
N0	17.735 ± 0.895c	1.271 ± 0.125a	13.945 ± 0.389c
N5	18.678 ± 1.005bc	1.264 ± 0.126a	14.765 ± 0.524c
N10	20.877 ± 0.916b	1.197 ± 0.106a	17.378 ± 0.637b
N20	23.106 ± 0.981a	1.175 ± 0.093a	19.374 ± 0.555a
N40	21.979 ± 0.882ab	1.288 ± 0.059a	17.177 ± 0.383b

注:同列数据后不同小写字母代表在不同氮素添加水平之间差异显著(P<0.05)。

2.2 不同植物功能群氮磷化学计量变化特征

根据可食性划分的各功能群在不同氮素添加水平下变化差异较大。图 2-A 显示,有毒类草本和豆科类植物氮含量较高,并随着施加氮素浓度的增加,在 N40 水平分别达到 24.92 g/kg 和 30.70 g/kg。莎草科的叶片氮含量虽然较低,但呈现持续增加的趋势;相比 N0 水平,叶片氮含量在 N40 水平下提高了 45.36%。无毒类草本变化在 20.02~22.83 g/kg 之间,且差异不显著。禾本科草本表现为先增加后降低的趋势,在 N20 水平含量最高,高出 N0 水平 24.72%。不同生活型植物叶片氮含量随着氮素添加浓度的增加,虽然大体呈现不断增加的趋势,但变化程度存在一定的差异。多年丛生禾草叶片氮含量较低,变化范围是 13.78~16.45 g/kg,差异不显著;多年根茎禾草叶片氮含量也较低,随着氮素水平的提高,呈逐渐增加的趋势,N20 和 N40 显著高于 N0 水平。一年生和二年生草本叶片氮含量最高,从 25.25 g/kg 增加到 29.26 g/kg,增加了 11.89%。多年生非禾草植物和小灌木/半灌木的叶片氮含量呈上升趋势,但多年生非禾草叶片氮含量在不同氮素水平之间差异不显著。

图 2-B 表明,不同功能群叶片磷含量在不同氮素添加水平下变化特征存在较大差异。禾本科和莎草科植物含量较低,在 N40 水平含量最高,分别为 1.07 g/kg 和 1.27 g/kg,其中莎草科植物 N40 水平高于未施肥样地 55.84%。有毒类和无毒类草本植物含量较高,均大于 1.4 g/kg,但差异不显著,其中有有毒类草本植物呈下降趋势。豆科类草本叶片磷含量在

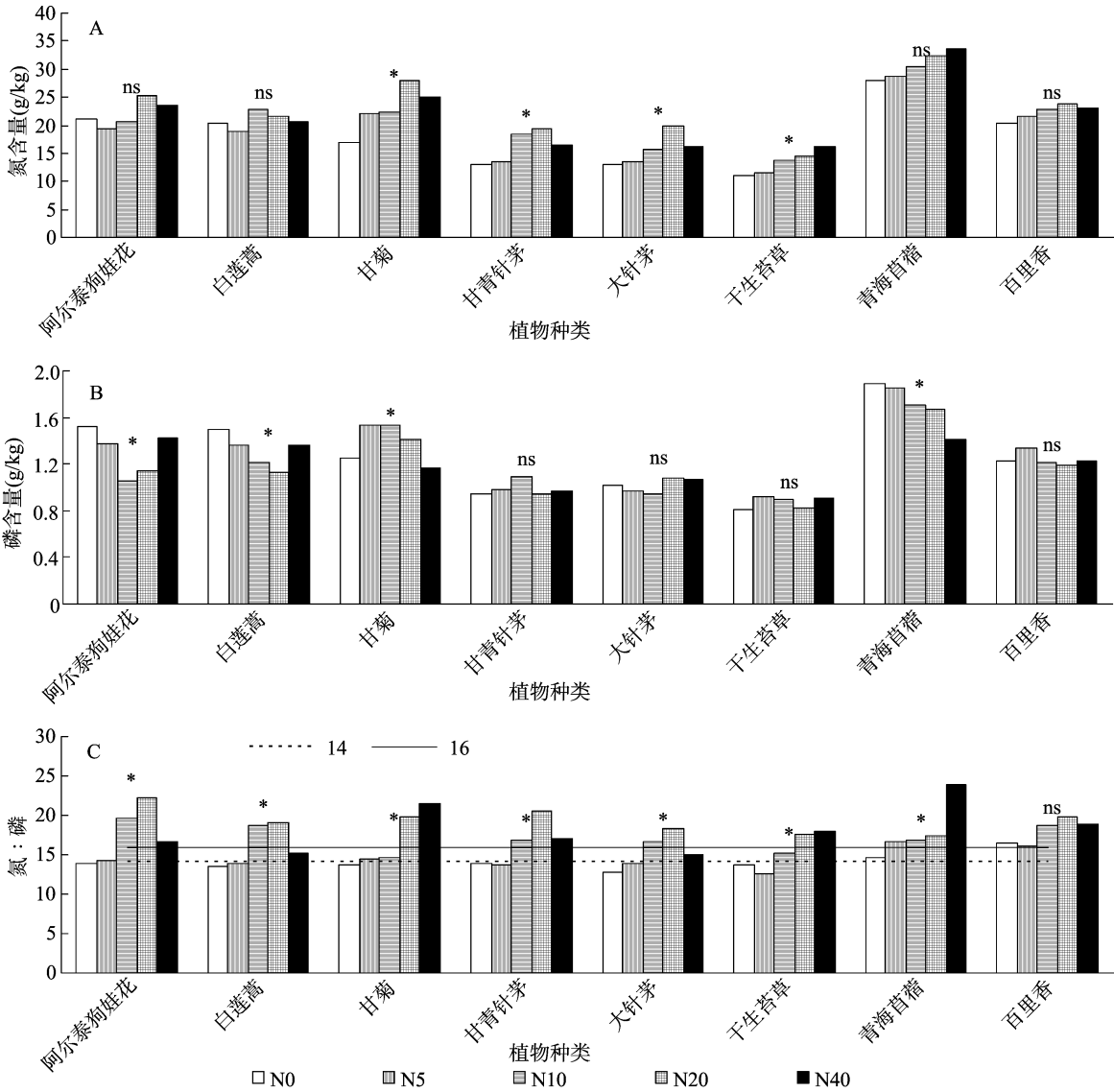


图1 不同氮素添加水平优势种叶片氮磷化学计量变化特征

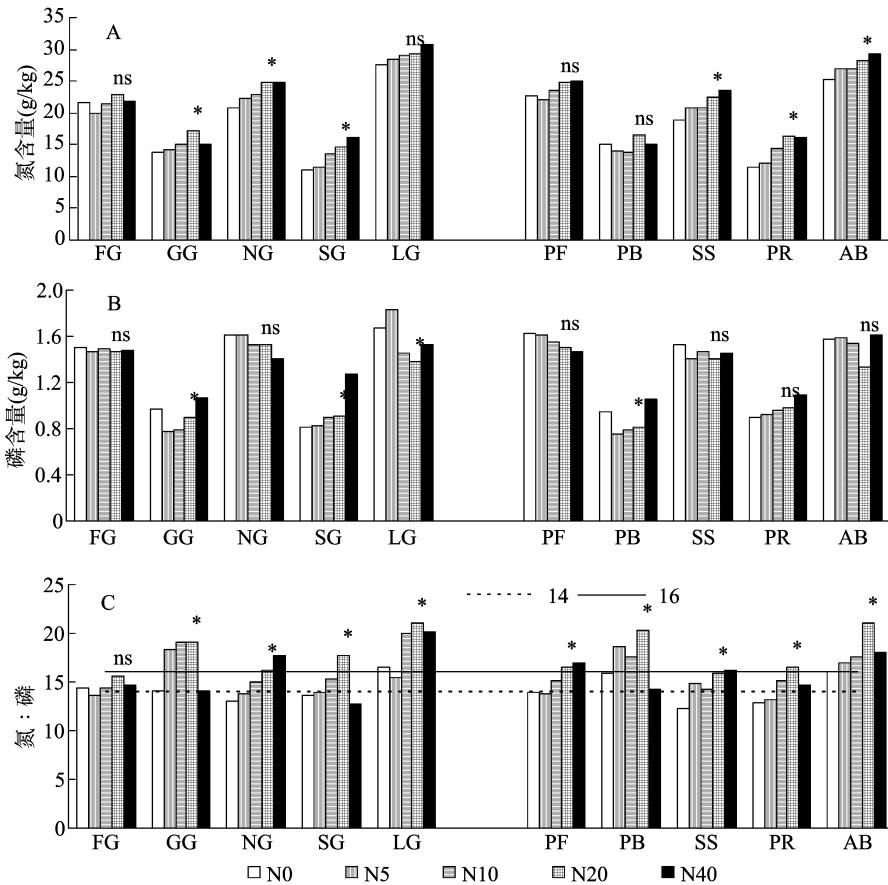
不同氮素添加水平差异显著,在 N5 水平含量最高,为 1.83 g/kg,高于 N20 水平 32.34%。不同生活型植物变化趋势也不尽相同,多年生非禾本草本和小灌木/半灌木虽然差异不显著,但总体上呈下降趋势。多年生根茎禾草叶片氮含量随着氮素的添加逐步增加,但差异不显著,变化范围为 0.90 ~ 1.10 g/kg。一年生和二年生草本变化范围也较小,差异不显著,在 N20 水平下,为 1.34 g/kg。

图 2 - C 显示,不同可食性功能群的氮:磷在低氮水平下较低,但随着氮素的添加变化特征有所差别。无毒类非禾本植物变化在 13.63 和 15.61 之间,且不同氮素添加水平间差异不显著;有毒类草本叶片氮:磷表现为逐渐增加的趋势,在 N40 水平下,为 17.67。禾本科、莎草科和豆科草本随着氮素的添加先增加后降低,在中氮水平下最高,分别为 19.13、17.67 和 21.09,分别高于未施肥样地 35.24%、29.45% 和 28.21%。不同生活型功能群变化规律也不尽相同。多年生非禾本草本和小灌木/半灌木叶片氮:磷逐渐增加,N40 水平分别高出 N0 水平的 21.86% 和 31.54%;多年丛生禾草、多年

根茎禾草以及一年生和二年生植物呈先增加后降低的趋势,在 N20 水平下最高,分别为 20.28、16.52 和 21.13。

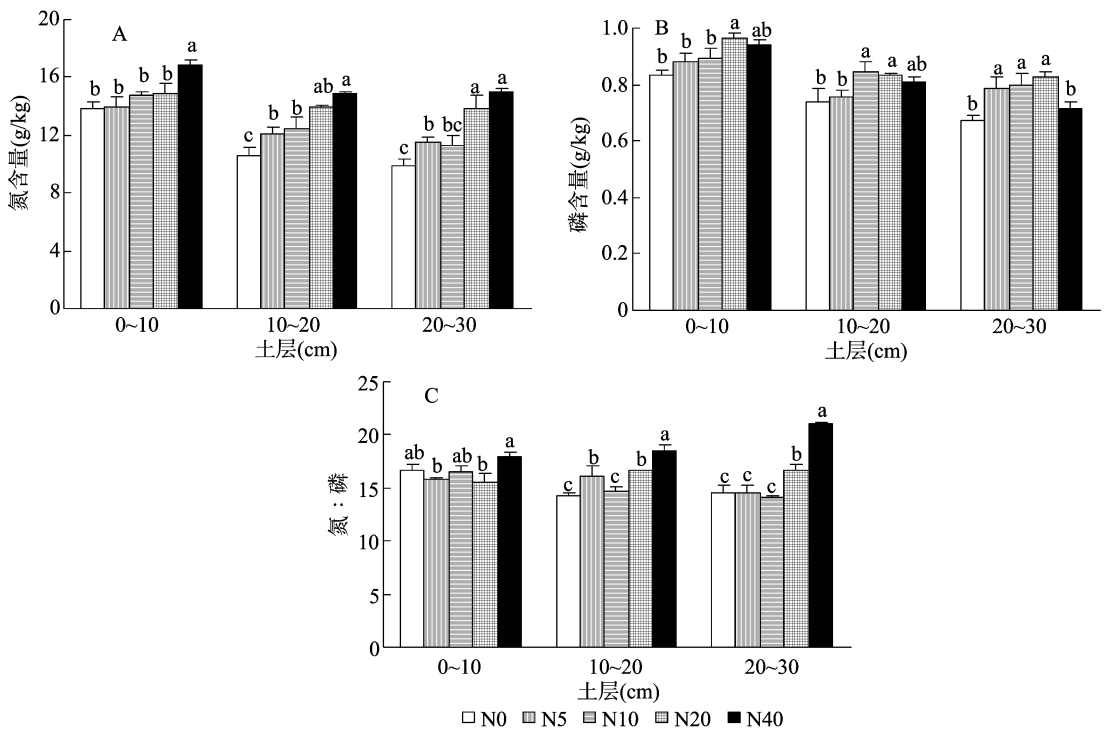
2.3 群落水平根系生态化学计量变化特征

从图 3 看出,群落水平根的氮磷化学计量特征在不同氮素添加水平下变化趋势存在一定的差异。图 3 - A 表明,各土层(0 ~ 30 cm)根氮含量变化趋势相似,均表现为随着氮素浓度的升高而逐步增加。与未施肥样地相比,0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm 和 20 ~ 30 cm 根氮含量施加尿素 40 g/m² 后分别提高了 21.71%、40.90% 和 51.87%。图 3 - B 显示,虽然 0 ~ 10 cm 根磷含量总体上高于 10 ~ 20、20 ~ 30 cm,但随着氮素添加水平的提高均表现为先增加后降低的趋势,在 N20 达到峰值,显著高于未施肥样地,低氮水平和高氮水平间差异不显著。由图 3 - C 得知,0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30 cm 群落水平根氮:磷大部分高于 15,在 N40 水平下最高,分别为 18.001、18.489 和 21.015。0 ~ 10 cm 根氮:磷各氮素添加水平变化范围较小,10 ~ 20 cm 根氮:磷在 N0 和 N10 较低,20 ~ 30 cm 在 N0、N5 和 N10 水平间差异不显著。



SS 为半灌木或小灌木, PR 为多年生根茎禾草, PB 为多年生丛生禾草, PF 为多年生非禾本草本植物, AB 为一年生和二年生植物; SG 为莎草类, GG 为禾草类, LG 为豆类, FG 为非禾本科植物 (无毒类), NG 为有毒类

图2 不同氮素添加水平功能群叶片氮磷化学计量变化特征



不同字母代表在不同氮素添加水平之间差异显著 ($P < 0.05$), 相同字母代表差异不显著

图3 不同氮素添加水平根系氮磷化学计量变化特征

3 讨论

3.1 植物氮磷生态化学计量变化特征

氮磷是组成植物体最重要的元素,且受周围环境变化影响较大。有研究表明,我国天然草地叶片的平均氮磷含量分别为 28.6 g/kg 和 1.9 g/kg^[11],而黄土高原植物叶片平均氮磷含量分别为 24.10 g/kg 和 1.60 g/kg^[12]。本研究发现黄土高原斯泰普草原未施肥的对照样地常见优势种氮磷含量均低于全国草地和黄土高原植物叶片的平均值,氮磷比除百里香外,其他物种均低于 14,说明该区域可能受氮限制。不同植物由于资源需求、竞争等级、功能性状以及系统发育等因素的差异对氮磷等矿质元素的利用策略也不同^[13]。研究表明,氮素添加显著增加植物叶片氮磷含量和氮磷比^[14-15]。也有研究认为植物氮磷比在氮素添加后并没有显著变化^[16]。张文瑾等的研究表明:低水平的氮添加对披针叶黄华、油蒿的叶片氮磷化学计量特征无明显影响,但高氮添加条件下,赖草、糙隐子草和刺藜的叶片氮含量及赖草、刺藜叶片氮磷比显著增加^[17]。本研究显示,氮素添加对叶片磷含量虽无显著影响,但总体上增加植物叶片氮含量和氮磷比,且氮磷平均值 > 14,说明氮素添加缓解了氮素的限制,植物生长有可能受氮磷共同限制或者磷限制。不同物种随氮素添加浓度的增加,化学计量变化特征不同。青海苜蓿、白莲蒿和百里香的叶片氮含量变化差异不显著;甘菊、阿尔泰狗娃花、大针茅和甘青针茅在中氮水平下叶片氮含量最高,在高氮水平有下降的趋势,这可能是由于氮素添加解除了氮限制,促进植物的生长,但氮素添加浓度过高,产生了明显的抑制作用。甘青针茅、大针茅、干生苔草和百里香叶片磷含量没有显著差异,青海苜蓿磷含量随着氮素添加呈下降趋势,可能是因为叶片氮含量的增加促进了植物的光合作用,光合作用的增强反过来加大了对磷的需求,但并没有外源磷素的添加,从而造成了叶片贮存的磷减少。不同物种氮磷比的变化趋势表明,氮素添加使得植物的生长由氮限制转为磷限制。

3.2 不同植物功能群氮磷生态化学计量变化特征

不同功能群植物叶片氮磷含量及其化学计量比存在显著差异,表明各个功能群植物对同一环境的适应和响应能力不同,所表现出的养分利用策略也存在较大差异^[6,11]。有研究表明,氮添加整体上增加叶片氮磷的含量,但草本层植物对氮添加的响应比乔木层和灌木层植物更加敏感,这可能与草本植物较快的养分利用和转化效率有关^[18]。在本研究中,莎草科和禾本科的叶片氮含量较低,豆科植物氮含量较高;氮添加对豆科植物无显著影响,是因为豆科植物一般通过生物固氮作用能满足其自身氮的需求,其生长过程氮素的供应与否对其影响并不明显,这与高宝宗等的研究结果^[19]相似。对于不同生活型的植物而言,一年生和二年生植物的氮含量较高,随着氮素添加差异显著,说明生活史较短的植物养分转换率快,对氮素添加较为敏感;多年生丛生禾本由于其自身稳定性较高,随着氮素的添加,叶片氮含量变化并不显著。本研究还发现,氮素添加对大部分不同功能群植物的叶片磷含量影响较小,差异不显著,这是因为植物磷主要来源于土壤,而土壤的磷主要受成土母质的影响。不同功能群氮磷计量比在中低氮水平较高,这是因为外源氮的添加增加了土壤有效氮的供应,

植物叶片氮素也迅速增加,从而氮磷比整体上呈上升趋势;而在高氮浓度下,虽然土壤有效氮增加,但 pH 值会降低,从而影响植物养分的转移和利用,导致植物叶片氮磷比在较高氮浓度有所下降。

3.3 群落水平根系化学计量变化特征

根系作为吸收土壤中氮磷等元素的重要功能载体,根系氮磷含量是营养物质迁移循环的重要组成部分。本研究表明,根系各土层氮含量整体上普遍低于植株叶片氮含量,随着氮素添加浓度的增加整体上呈现升高的趋势,说明氮添加增加了土壤有效氮的含量,促进根系养分的吸收。一般而言,氮素添加后,土壤中磷酸酶活性增强,加速了土壤中磷的转化^[20],从而促进植物对磷的吸收。因此,各土层磷含量在氮素添加后呈增加趋势。但氮素浓度过高在一定程度上抑制了磷酸酶活性,故各土层磷含量在高氮水平下有降低的趋势。本研究还发现根系磷含量对氮素添加的响应比氮含量弱,这可能是因为根系磷含量主要受土壤磷含量的影响,而同一研究区土壤异质性较小,土壤磷含量变异较小。各土层根系氮磷比在未添加氮素样地变化在 14.2 ~ 16.6,普遍高于全球陆生植物根氮磷比平均值^[21],说明根系可能受磷的限制;在低氮浓度下氮磷比未能显著增加,但高氮浓度氮磷比显著高于未添加样地,均大于 16,表明高氮水平加剧了磷元素的限制。

参考文献:

- [1] 侯向阳,尹燕亭,王婷婷. 北方草原牧户心理载畜率与草畜平衡生态管理途径[J]. 生态学报,2015,35(24):8036-8045.
- [2] 齐玉春,董云社,耿元波,等. 我国草地生态系统碳循环研究进展[J]. 地理科学进展,2003,22(4):342-352.
- [3] 程积民,程杰,杨晓梅. 黄土高原草地植被与土壤固碳量研究[J]. 自然资源学报,2011,26(30):401-411.
- [4] 贺金生,韩兴国. 生态化学计量学:探索从个体到生态系统的统一化理论[J]. 植物生态学报,2010,34(1):2-6.
- [5] 曾冬萍,蒋利玲,曾从盛,等. 生态化学计量学特征及其应用研究进展[J]. 生态学报,2013,33(18):5484-5492.
- [6] Güsewell S. N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance[J]. New Phytologist,2004,164(2):243-266.
- [7] Güsewell S. High nitrogen:phosphorus ratios reduce nutrient retention and second-year growth of wetland sedges[J]. New Phytologist,2005,166(2):537-550.
- [8] 银晓瑞,梁存柱,王立新,等. 内蒙古典型草原不同恢复演替阶段植物养分化学计量学[J]. 植物生态学报,2010,34(1):39-47.
- [9] Evans J R. Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C₃ plants[J]. Oecologia,1989,78(1):9-19.
- [10] 何玉惠,刘新平,谢忠奎. 氮素添加对黄土高原荒漠草原草本植物物种多样性和生产力的影响[J]. 中国沙漠,2015,35(1):66-71.
- [11] Han W, Fang J, Guo D, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. New Phytologist,2005,168(2):377-385.
- [12] 郑淑霞,上官周平. 黄土高原地区植物叶片养分组成的空间分布格局[J]. 自然科学进展,2006,16(8):965-973.
- [13] Güsewell S, Koerselman W. Variation in nitrogen and phosphorus concentrations of wetland plants[J]. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics,2002,5(1):37-61.

李懿超,沈润平,黄安奇. 基于深度学习的湘赣鄂地区植被变化及其影响因子关系模型[J]. 江苏农业科学,2019,47(3):213-218.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.03.051

基于深度学习的湘赣鄂地区植被变化 及其影响因子关系模型

李懿超, 沈润平, 黄安奇

(南京信息工程大学地理科学学院, 江苏南京 210044)

摘要:构建 NDVI 及其影响因子之间的关系模型是对区域植被变化进行预测的重要方法之一,然而传统的模型大多通过线性回归方法构建,且主要选取单一影响因子进行模型构建。深度学习是一种有效训练深层神经网络的机器学习算法,具有训练速度快、预测精度高的优点,近年来被应用于图像识别、回归分析等各领域。笔者引入深度学习方法,以气象、土壤、地形等多因子为模型自变量,以 MODIS-NDVI 为因变量构建关系模型,应用于湘赣鄂地区 2005—2015 年植被变化的预测中,对所建模型的适用性进行了评价。结果表明:深度学习模型与线性回归模型相比预测精度更高,预测效果更好,NDVI 深度学习预测值与原始 MODIS-NDVI 值的相关系数达到 0.804。可见,深度学习具有较强的模型构建及预测能力,能够地对区域植被变化进行有效的预测,进而为作物产量估算、冻害监测、植被覆盖度监测等研究提供帮助。

关键词:植被变化;影响因子;深度学习;关系模型;预测

中图分类号: S181; S127 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)03-0213-06

归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)是目前最常用的反映植被状况的指标,可以较准确地反映植被的覆盖程度和生长状况^[1]。NDVI 是遥感影像近红外波段反射值(near infrared, NIR)和红光波段反射值(red, R)之差与 NIR 和 R 之和的比值,在全球及区域植被研究中得到了普遍的应用^[2]。NDVI 在农业、林业、土地利用等领域具有重要作用。在农业应用中,NDVI 能够用来较准确地估算作物产量与作物叶面积指数,对作物的冻害及病虫害状况进行监测^[3]。在林业应用中,NDVI 可用于对森林覆盖进行遥感监测,估算区域植被覆盖度,对不同林地覆盖类别进行识别

与提取^[4]。NDVI 在农林业中的应用对相关生产实践及科学研究具有实际的指导意义。NDVI 的时空变化受到多种影响因子的影响,学者在 NDVI 与降水量、气温等气象因子的相关性及其关系模型等领域已经做了一些研究^[5-7]。Ma 等对秦岭山地 NDVI 变化与气温的关系进行了研究,指出气温对 NDVI 变化的影响存在 2~3 旬左右的滞后效应^[8];韩雅等对中国区域 AVHRR-NDVI 与气温和降水量的相关关系进行了分析,建立了 NDVI 与气温和降水量的线性回归模型,指出气象因子对 NDVI 的影响有显著的空间差异^[9];Yang 等对甘肃地区降水量、气温与 NDVI 的关系进行了研究,发现降水量是影响该地区植被生长的主导气象因子^[10]。现有研究着重探讨了降水量、气温 2 种气象因子与 NDVI 的相关关系,而忽视其他影响因子与 NDVI 的关系。同时,相关研究构建的 NDVI 及其影响因子的关系模型以线性回归模型为主,较少利用其他方法构建模型。深度学习算法的基本结构是深度神经网络,最早由 Hinton 等于 2006 年在深度置信网络(DBN)的基础上提出,解决了深层结构的优化问题,可用于对数据进

收稿日期:2018-06-23

基金项目:国家自然科学基金重点项目(编号:91437220);国家重点基础研究发展计划(编号:2010CB950700)。

作者简介:李懿超(1992—),男,江苏南京人,硕士研究生,主要从事生态环境遥感研究。E-mail:20141223313@nuist.edu.cn。

通信作者:沈润平,博士,教授,主要从事遥感建模与分析研究。E-mail:rpshen@nuist.edu.cn。

[14]安 卓,牛得草,文海燕,等. 氮素添加对黄土高原典型草原长芒草氮磷重吸收率及 C:N:P 化学计量特征的影响[J]. 植物生态学报,2011,35(8):801-807.

[15]王 雪,雒文涛,庾 强,等. 半干旱典型草原养分添加对优势物种叶片氮磷及非结构性碳水化合物含量的影响[J]. 生态学杂志,2014,33(7):1795-1802.

[16]Zhang L X, Bai Y F, Han X G. Differential responses of N:P stoichiometry of *Leymus chinensis* and *Carex korshinskyi* to N additions in a steppe ecosystem in Nei Mongol[J]. Acta Botanica Sinica, 2004, 46(3): 259-270.

[17]张文瑾,张宇清,余维维,等. 氮添加对油蒿群落植物叶片生态化学计量特征的影响[J]. 环境科学研究,2016,29(1):52-58.

[18]王乔妹怡,郑成洋,张歆阳,等. 氮添加对武夷山亚热带常绿阔叶林植物叶片氮磷化学计量特征的影响[J]. 植物生态学报, 2016, 40(11): 1124-1135.

[19]高宗宝,王洪义,吕晓涛,等. 氮磷添加对呼伦贝尔草原 4 种优势植物根系和叶片 C:N:P 化学计量特征的影响[J]. 生态学杂志,2017,36(1):80-88.

[20]Marklein A R, Houlton B Z. Nitrogen inputs accelerate phosphorus cycling rates across a wide variety of terrestrial ecosystems[J]. New Phytologist, 2012, 193(3): 696-704.

[21]Jackson R B, Mooney H A, Schulze E D. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1997, 94(14): 7362-7366.