
试验研究

黄土丘陵区不同降水梯度对草地群落 化学计量学特征的影响

郭宁^{1,2}, 姜基春³, 王国强³, 焦峰^{1,3}

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 研究草地群落各组分(植物叶片、根系和土壤)碳氮磷化学计量特征对降水量变化的响应规律,以揭示降水量对黄土丘陵区草地生态系统化学计量学特征的影响。[方法] 以黄土丘陵区自然恢复草地为研究对象,于2017—2018年在安塞试验站建立野外控雨试验平台,分别设置减雨60%,减雨40%,减雨20%,自然降水,增雨20%,增雨40%,增雨60%共7个处理,采用遮雨棚法研究降水改变对植物的叶片、根系以及土壤生态化学计量特征的影响。[结果] ①随降水量增加,植物生长水分限制得到有效缓解,水分胁迫作用逐渐减缓,从而使叶片N、P含量整体呈现显著下降趋势($p < 0.05$)。叶片C/N、C/P整体呈现显著下降趋势($p < 0.05$)。②降水梯度改变对根系P化学计量特征影响较为显著($p < 0.05$);同时,对根系C/P、N/P也有显著影响($p < 0.05$)。③控雨处理仅对土壤C含量有显著影响($p < 0.05$),可能因为极端降水影响了土壤微生物的活性,导致土壤有机C积累减缓。[结论] 水分是黄土丘陵区草地植物对N、P吸收利用的制约因子;降水量可以改变草地群落的养分限制格局,随着降水量的增加,植物生长受P的限制越强烈,植物生长由同时受N、P两者的限制转为受P限制。

关键词: 降水梯度; 黄土丘陵区; 草地群落; 化学计量学

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)02-0001-08

中图分类号: S812.2

文献参数: 郭宁, 姜基春, 王国强, 等. 黄土丘陵区不同降水梯度对草地群落化学计量学特征的影响[J]. 水土保持通报, 2020, 40(2): 1-8. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.02.001; Guo Ning, Jiang Jichun, Wang Guoqiang, et al. Effects of different precipitation gradients on stoichiometric characteristics of grassland communities in loess hilly region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(2): 1-8.

Effects of Different Precipitation Gradients on Stoichiometric Characteristics of Grassland Communities in Loess Hilly Region

Guo Ning^{1,2}, Jiang Jichun³, Wang Guoqiang³, Jiao Feng^{1,3}

(1. Institute of Soil and Water Conservation CAS & MWR, Yangling, Shaanxi

712100, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The response of carbon, nitrogen and phosphorus of each component (plant leaves, roots and soil) of grassland community to precipitation change was studied, in order to reveal the influence of precipitation on the stoichiometric characteristics of grassland ecosystem in loess hilly region. [Methods] The natural restored grassland in loess hilly region was taken as the research object, a field rain control test platform was established at Ansai experimental station during 2017—2018, with 7 treatments including 60% rain reduction, 40% rain reduction, 20% rain reduction, natural precipitation, 20% rain increase, 40% rain increase, and 60% rain increase. The canopy method was adopted to study the influence of precipitation change on the leaves, roots and soil ecological stoichiometric characteristics of plants. [Results] ① With the increase of precipitation, the water restriction in plant growth was effectively alleviated, and the effect of water stress gradually slowed down, so that the N and P contents in leaves showed a significant decline ($p < 0.05$).

收稿日期: 2020-01-10

修回日期: 2020-02-19

资助项目: 国家重点研发计划项目“植物—土壤—大气碳氮耦合循环动力学过程”(2016YFA0600801); 科技基础性工作专项(2014FY210130)

第一作者: 郭宁(1994—), 男(汉族), 黑龙江省双鸭山市人, 硕士研究生, 研究方向为草原生态学。Email: 185_00241155@163.com.

通讯作者: 焦峰(1967—), 男(汉族), 陕西省三原县人, 博士, 副研究员, 主要从事水土保持环境效应评价方面的研究工作。Email: Jiaof@ms.iswc.ac.cn.

And the C/N and C/P of the leaves also showed a significant downward trend ($p < 0.05$). ② The change of precipitation gradient had a significant effect on the P contents of root system ($p < 0.05$). The change of precipitation gradient had significant influence on root C/P and N/P ($p < 0.05$). ③ Rain control treatment only had significant effect on soil C content ($p < 0.05$), which may be because extreme precipitation affected the activity of soil microorganisms, resulting in a slow accumulation of soil organic C. [Conclusion] Water is the limiting factor for the absorption and utilization of N and P by grassland plants in loess hilly region. Precipitation can change the nutrient restriction pattern of grassland community. With the increase of precipitation, plant growth is more restricted by P, and plant growth will changed from being restricted by both N and P to being restricted by P.

Keywords: precipitation gradient; loess hilly region; grassland community; stoichiometry

近几十年来,化石燃料燃烧与人类活动加剧了全球气候变暖。而全球气候变暖直接影响了整个生态系统的水循环,致使全球及区域降水格局发生改变。尽管在过去 100 a,全球降水量有增加趋势,但是干旱半干旱等生态脆弱区的降水量却逐渐减少,并且干旱、洪涝等极端降水事件频繁出现。在我国西北地区,降水格局不断发生改变,直接影响植物生长与分布。草地生态系统作为黄土丘陵区分布最广泛的生态系统,因而有必要深入研究黄土丘陵区草地生态系统对降水梯度改变的响应。黄土丘陵区土壤水分大部分来自降水,降水不仅可以使土壤水分的有效性得到改变,同时对植物、根系和土壤系统中的元素循环作用也不可忽视。降水通过改变土壤含水量来改变植物叶片养分浓度,影响单位面积上叶片光合能力,从而改变水分的利用效率。土壤 N、P 的有效性和降水有着显著的相关性,这是植物体、土壤养分含量与气候变化等环境因子综合作用的结果^[1]。研究表明,降水量的变化会显著影响植物光合作用与土壤呼吸,从而对生态系统的碳氮循环等功能产生影响,但没有指明降水梯度对生态系统碳氮循环的具体影响。此外,已有研究^[2]表明降水可以提高土壤 N 的转化和移动,从而提升植物体对 N 元素的有效吸收,但也有研究表明降水过多容易引发土壤 N 流失,使 N 含量降低的报道。同时降水也可以通过影响土壤风化速率而改变土壤全 P 的空间分布格局,从而改变土壤全 P 含量。因此研究不同降水梯度对植物和土壤化学计量特征的影响,可为降水情况日益复杂的黄土丘陵区草地生态系统恢复提供重要的理论依据。

植物主要通过叶片进行光合作用,其 N/P 可以判定植物受到养分的制约情况。土壤 N/P 也可被用于养分限制阈值的判定^[1]。此外,根系在植物体养分吸收方面发挥着不可忽视的作用,研究^[3]表明根系对土壤养分含量影响大于叶片对土壤养分含量的影响。与其它器官相比,根系在评价年净初级生产力和养分循环方面具有重要意义^[4]。土壤为植物的生长提供

必需的营养元素^[5],而植被通过改善土壤结构和养分含量作为响应^[6]。植物体与土壤之间的元素循环是元素在植物体与土壤之间进行转换,而根系作为介导者将植物体与土壤联系起来。降水量改变通过影响植物体、根系和土壤中 C、N、P 的动态,进而改变叶片—根系—土壤系统中 C、N、P 之间的关系。通过研究植物叶片—根系—土壤系统中 C、N、P 之间的关系分析植物的养分限制情况,对揭示植物对降水梯度的适应策略具有指导性意义。本研究通过野外采样和室内试验对叶片、根系和土壤养分数据综合分析,探索黄土丘陵区草地生态系统植物叶片、根系以及土壤化学计量特征对降水改变的适应策略与响应规律,为预测黄土丘陵区草地生态系统植被恢复过程中植物养分限制性元素、土壤与根系养分的输入输出能力以及全球变化背景下降水改变与 C、N、P 元素之间关系提供重要的参考,进而为黄土丘陵区草地群落的风险监测以及恢复治理提供新思路。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

研究区设置在陕西省北部安塞县墩山的安塞水土保持综合试验站,安塞县地处西北内陆黄土高原腹地,鄂尔多斯盆地边缘,东经 $108^{\circ}51'44''$ — $109^{\circ}26'18''$,北纬 $36^{\circ}30'45''$ — $37^{\circ}19'3''$ 。其气候类型主要为暖温带大陆性气候,年平均气温 8.8°C ,年均降水量为 531.4 mm。安塞县主要土壤类型是黄绵土,其土质疏松,且抗蚀性与抗冲性比较差,因此生态环境比较脆弱。主要地貌类型为黄土崩状丘陵、沟谷阶地以及黄土梁涧,在植被区划分上属于森林草地区,该区域草本植物多以禾本科、菊科以及豆科为主,区域内草本植物主要包括白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、中华隐子草(*Cleistogenes chinensis*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、铁杆蒿(*Tripolium vulgare*)草木樨状黄耆(*Astragalus*

melilotoides)、茼蒿(*Artemisia giraldii*)等植物。

1.2 研究方法

1.2.1 样地布设 经过实地考察以及综合试验需求,于 2017 年在安塞墩山选择了一片地势平坦,人为干扰较少且立地条件较为相似的天然草地群落作为试验地。根据研究区域的近 5 a(2012—2016 年)平均降水量(CK=531.4 mm),将样地设置为 P₆₀₋(减雨 60%,244.8 mm),P₄₀₋(减雨 40%,323.8 mm),P₂₀₋(减雨 20%,426.3 mm),P₀(CK,536.5 mm),P₂₀₊(增雨 20%,639.8 mm),P₄₀₊(增雨 40%,749.2 mm),P₆₀₊(增雨 60%,828.2 mm)7 个降水梯度,用遮雨棚法对草地群落进行人工模拟降水。遮雨棚主要分为支撑结构、遮雨结构和集雨结构 3 部分。支撑结构:支撑材料为钢架,结构设置为一端高,一端低,连



接高低两端的横向钢架与水平面呈 20° 夹角。遮雨结构:遮雨材料为 V 形槽,采用透光率超高的有机玻璃作为遮雨棚的主要材料,将有机玻璃板做成长条 V 形槽,呈栅格状形式排列在不锈钢制框架上,并用螺丝将其固定。根据遮雨量不同,设置不同 V 形槽数量,即-20%降水量小区架设 6 个 V 形槽;-40%降水量小区架设 12 个 V 形槽;-60%降水量小区架设 18 个 V 形槽。集雨结构:将大圆形 PVC 管侧面设置矩形切口,将遮雨结构的 V 形槽管末端插入切口,再通过 PVC 管引流到带有刻度的圆桶。雨后将不同降水梯度水桶里的雨水用小型抽水泵均匀地洒入对应的增加降水小区。每个处理随机分布设置了 3 个重复小区,共 21 个试验小区,小区面积为 3 m×3 m,各小区间设置 2 m 的缓冲带(见图 1)。



图 1 试验小区布置(左)和人工模拟降水设施布置(右)

1.2.2 样品采集与处理 在 2018 年 8 月中旬草地群落生长旺盛季节,在每个小区分别设置 1 m×1 m 的采样方进行草地群落特征调查,在每个样方内摘取所有物种植物叶片装入纸质信封回实验室。使用内径为 7 cm 的土钻在每个小区内随机选取 3 个点分别采集表层 0—30 cm 深度的土柱,将土柱破碎后过 16 目(孔径 1.25 mm)的筛子取其所有植物根系,去除根系表面的土壤、砾石等杂质后,将 3 份根系样品混合装入自封袋作为一份样品,21 个小区共 63 份根系样品;然后于实验室内根系置于 35 目(孔径 0.5 mm)的筛子中用大量清水反复冲洗去除附着根系的泥沙,并根据颜色、韧性判断去除死根,保留活根。将叶片、根系样品置于烘箱内(70 °C)烘干至恒重,再研磨粉碎过 100 目筛后放入塑封袋中备用。同时每个样方内另外采集 3 个点表层 0—30 cm 土壤样品,均匀混合后装入自封袋带回实验室,自然风干、碾碎、过筛(100 目)后备用。

1.2.3 植物与土壤养分测定 物叶片和根系的全 C

测定采用重铬酸钾—外加热法测定,全 N 采用凯氏定 N 法测定,全 P 采用钼钒黄比色法测定;土壤有机 C 采用重铬酸钾容量法—外加热法,土壤全 N 采用凯氏定氮法,土壤全 P 采用 HClO₄-H₂SO₄ 法,速效 P 采用 NaHCO₃ 法,测量土壤 NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 浓度,称取 10 g 土壤放入到烧杯里,加入 50 ml 的 2 mol/L KCl 溶液进行提取,并用 FLAstar 5000 流动注射分析仪(丹麦希尔勒洛德福斯特卡托)测定^[7-8]。

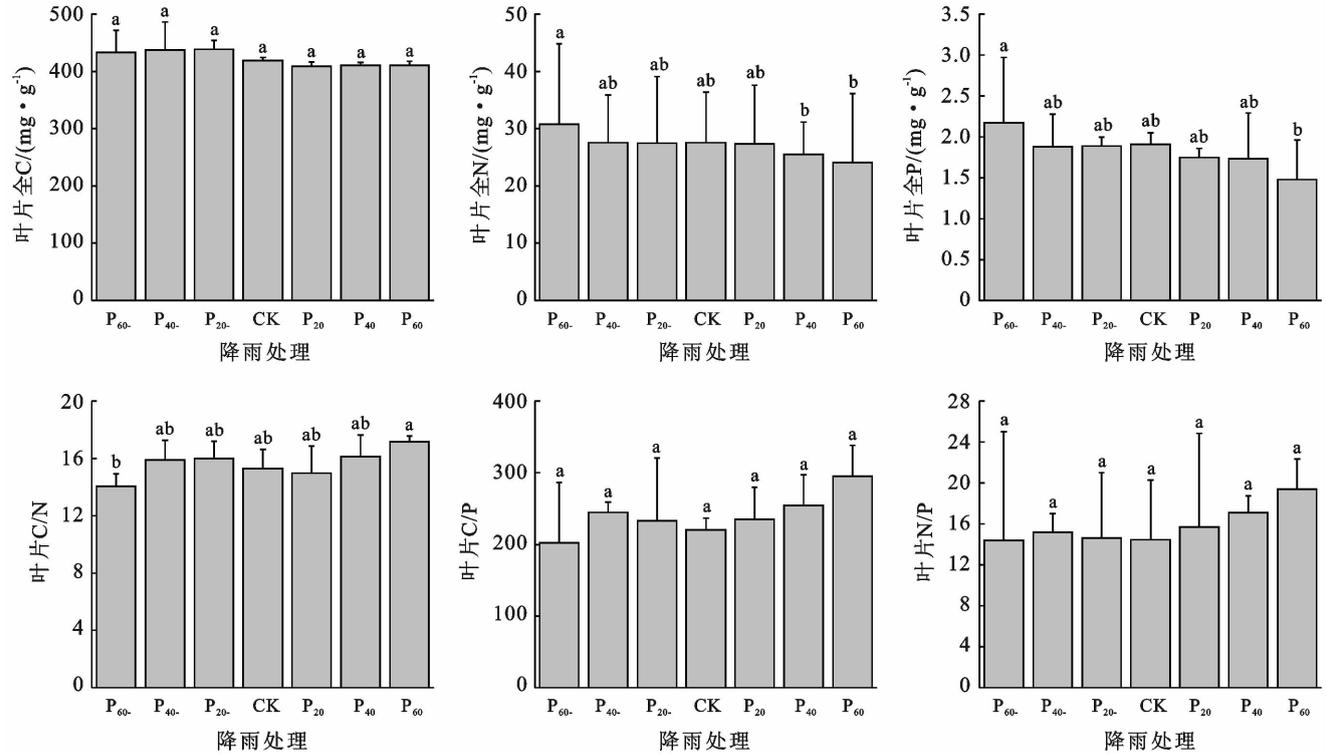
1.3 数据处理

采用 Excel 2010 对所有数据进行预处理后,用 SPSS 26.0 对所有数据进行正态分布检验,检验结果均符合正态分布,然后采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和 LSD 多重比较($\alpha=0.05$)对不同控雨处理下草地群落不同组分(叶片、根系和土壤)C, N, P 化学计量特征差异进行比较分析,并用相关分析不同组组间化学计量特征的相关性,做图采用 Origin 2018 软件。图表中数据格式均为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 降水梯度下对叶片 C, N, P 含量及化学计量的影响

叶片的 C, N, P 含量及化学计量随降水梯度变化规律如图 2 所示, 降水梯度对叶片 C 含量, C : P, N : P 影响不显著 ($p > 0.05$), 而与对照相比, 仅有 P_{60-} 与 P_{60} , P_{40} 的叶片 N 含量, P_{60-} 与 P_{60} 间的 P 含量和 C : N 存在显著差异 ($p < 0.05$), 表明增雨或减雨幅度较小



注:不同字母表示差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 2 叶片 C, N, P 化学计量特征沿降水梯度的变化规律

2.2 降水梯度对根系 C, N, P 含量及化学计量的影响

由图 3 可知, 降水梯度对根系 C, N 含量和 C/N 影响不显著 ($p > 0.05$), 对根系 P 含量、C/P, N/P 影响较为显著 ($p < 0.05$); 其中 P 的含量随着降水量的增加而降低, C/P, N/P 则与之相反, 呈上升趋势, 且在 P_{60} 时影响最为显著; 这可能是黄土丘陵区的土壤

时对各指标 (P_{40-} — P_{40}) 影响不显著, 体现了在草地植物与环境的协同进化中, 使黄土丘陵草地形成了自身独特的生理生态和生态化学计量调节机制, 在一定的水分胁迫条件下仍能适应这种特定的生境。总体上, 叶片的 C, N 和 P 含量随降水量增加而降低, C/N, C/P 和 N/P 比值随降水量增加而增大, 这表明降水增加使植物生长水分限制得到有效缓解, 水分胁迫作用逐渐减缓, 植物不需要分配大量的 N 元素到叶片光合器官与组织中以提高水分利用效率^[9-10]。

为沙壤土, 这表明在保水保肥能力较差的沙壤土环境下, 增雨条件使土壤速效 P 含量降低 (表 1), 而植物体需要维持较低的元素含量以达到其高效的元素利用效率^[11]。此外, 本研究发现, 草原群落根系的化学计量的变化趋势与叶片一致, 且根系中 C, N, P 含量均小于叶片中对应元素的含量。

表 1 降水梯度对土壤无机 N, 速效 P, 土壤含水量的影响

| 土壤指标 | 样地编号 | | | | | | |
|----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| | P ₆₀₋ | P ₄₀₋ | P ₂₀₋ | CK | P ₂₀ | P ₄₀ | P ₆₀ |
| 铵态氮/(mg·kg ⁻¹) | 2.66±0.13 ^a | 2.39±0.12 ^a | 2.27±0.11 ^a | 2.30±0.67 ^a | 2.17±0.25 ^{ab} | 2.09±0.16 ^{abc} | 1.62±0.29 ^c |
| 硝态氮/(mg·kg ⁻¹) | 2.49±0.43 ^a | 2.32±0.34 ^a | 2.21±0.16 ^a | 2.14±0.14 ^{ab} | 2.15±0.30 ^{ab} | 2.22±0.16 ^a | 1.78±0.04 ^c |
| 速效磷/(mg·kg ⁻¹) | 3.26±0.26 ^a | 3.13±0.27 ^a | 3.01±0.37 ^{ab} | 3.11±0.33 ^a | 3.00±0.05 ^{ab} | 2.94±0.15 ^b | 2.73±0.46 ^c |
| 含水量/% | 10.83±1.02 ^c | 12.12±0.68 ^d | 13.55±1.34 ^c | 13.99±0.81 ^c | 14.85±1.12 ^b | 15.27±0.61 ^{ab} | 15.83±0.47 ^a |

注:不同字母表示差异显著($p < 0.05$)。

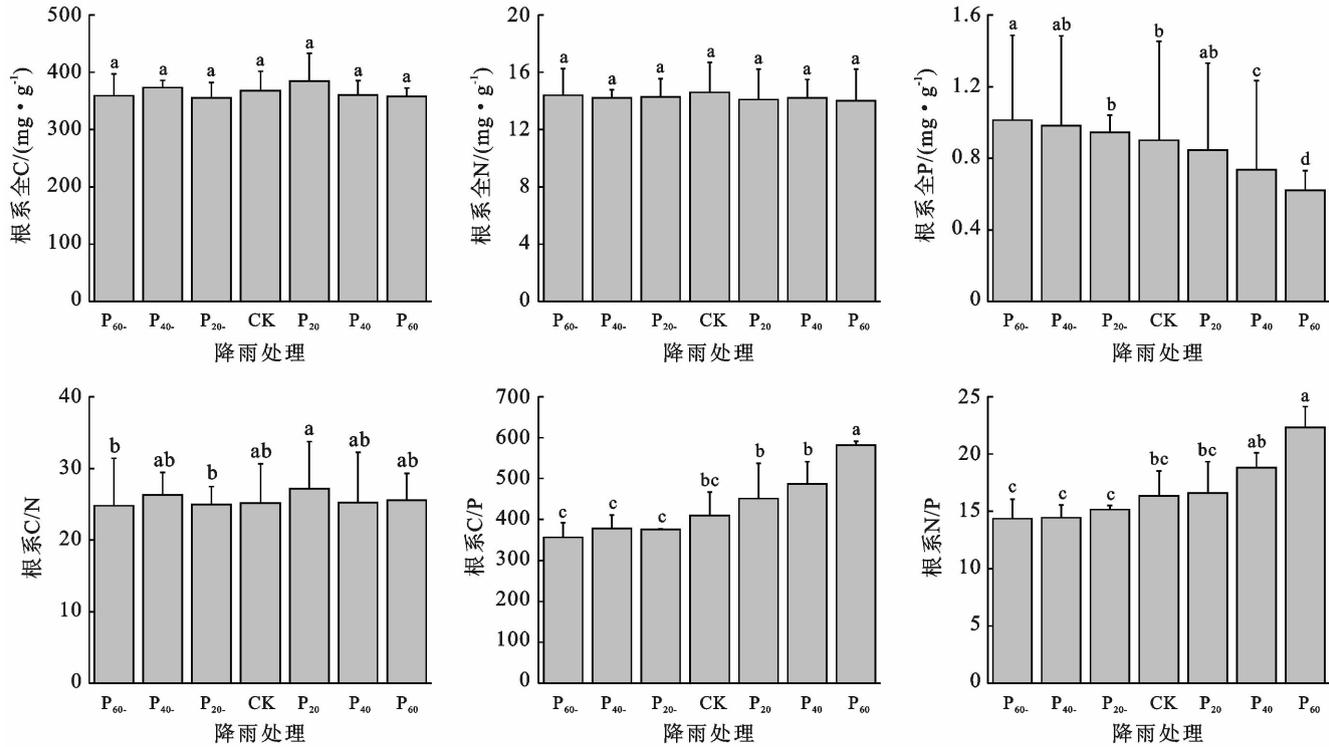


图 3 根系 C,N,P 化学计量特征沿降水梯度的变化规律

2.3 降水梯度对土壤 C,N,P 含量及化学计量的影响

如图 4 所示,不同降水处理对土壤 C 含量有显著影响($p < 0.05$),对土壤全 N、全 P 以及土壤化学计量无显著影响($p > 0.05$)。

与对照相比,仅极端增雨(增雨 60%)会显著降低土壤表层土壤 C 含量($p < 0.05$),这主要是因为极端降水可能影响了土壤微生物的活性,导致土壤有机 C 积累减缓^[8]。

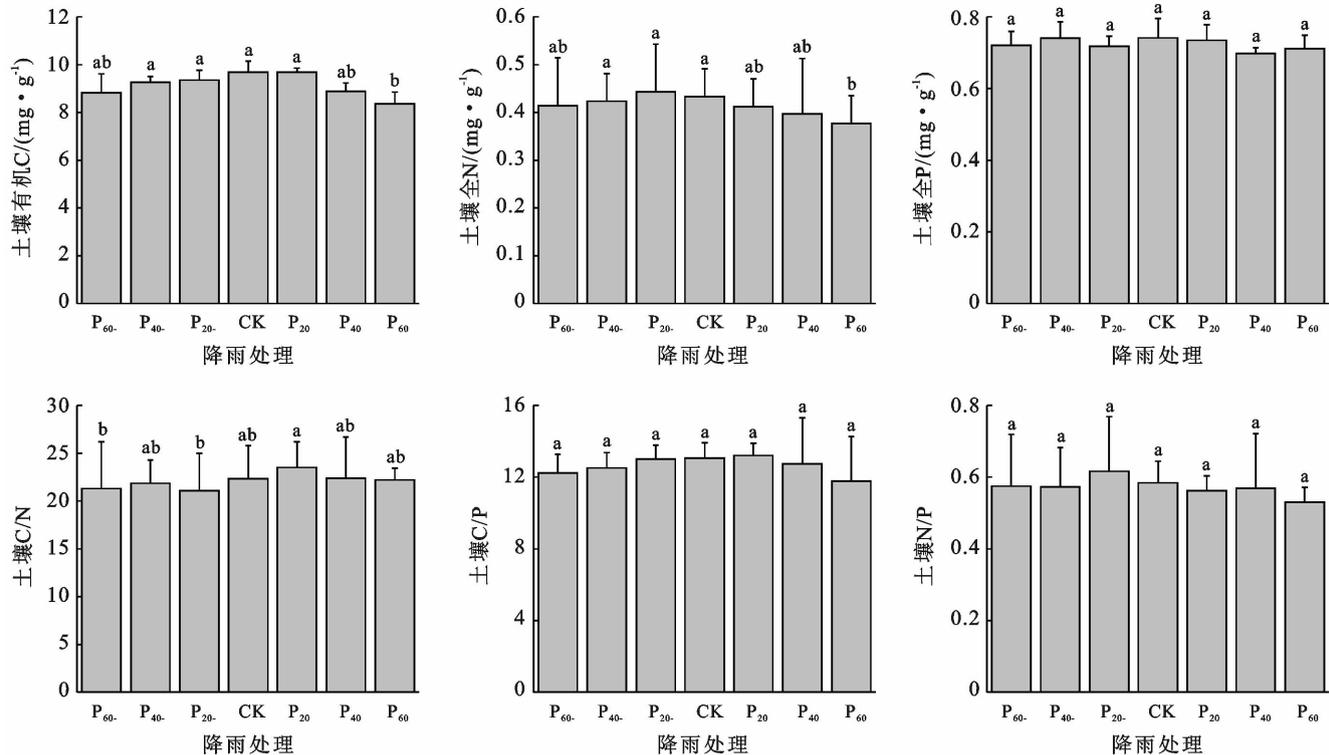


图 4 土壤 C,N,P 化学计量特征沿降水梯度的变化规律

2.4 降水梯度对叶片、根系和土壤的 C, N, P 化学计量相关性分析

表 2 果表明,叶片、根系和土壤 C, N, P 含量的平均值大小顺序均为:叶片>根系>土壤,三者的变异系数均小于 30%,属于轻度变异。土壤的 C, N, P 含量变异系数均在 10%以下;值得指出的是不同降水梯度下叶片的 C 含量变异系数仅为 1.86%, N, P 含量变异系数分别为 23.20%和 22.60%;根系的 C, N, P 含量变异系数分别为 12.36%, 15.58%, 14.58%;同时,叶片和根系的 C/P, C/N, N/P 变异系数也相对较大,表现出短期(一年)降水对土壤养分的影响较小,而对植物叶片和根系的养分含量与分配造成一定的影响。

将土壤、叶片和根系的 C, N, P 含量及其化学计量的对数转换值与降水量进行 Pearson 相关性分析结果表明(图 5),降水量仅与土壤的 N 含量呈显著负相关($p < 0.05$),对 C, P 含量及 C, N, P 化学计量比影响较小;降水量与叶片的 C 含量相关性不显著($p > 0.05$),与 N 含量呈极显著负相关($p < 0.01$),与 P 含量呈显著负相关($p < 0.05$);降水量与根系的 P 含量呈极显著负相关($p < 0.01$),与 C/P, N/P 均呈极显著正相关($p < 0.01$)。随着降水量的增加,叶片和根系的 C, N, P 及化学计量变化趋势基本一致,但这 3 种元素在叶片中的含量均高于根系的含量,尤其是 P 元素;根系的 C/N, C/P 均大于叶片,表现出随着降

水量的增加,在养分缺乏的条件下,植物体将更多养分优先供给地上部分的叶片以维持其正常生长;根系和叶片的 N/P 值的大小差异较小,表现出植物在环境变化过程中通过调节自身不同生长器官的元素含量比例来适应生境的生理特性^[12]。

表 2 草地群落植被—根系—土壤系统生态化学计量学特征

| 项目 | 指标 | 最小值/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) | 最大值/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) | 平均值/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) | 变异 系数/% |
|----|-----|---|---|---|------------|
| 叶片 | C | 409.07 | 438.63 | 423.11 | 1.86 |
| | N | 24.08 | 30.83 | 27.27 | 23.20 |
| | P | 1.48 | 2.17 | 1.84 | 22.60 |
| | C/N | 14.05 | 17.16 | 15.69 | 5.23 |
| | N/P | 14.40 | 19.38 | 15.35 | 28.78 |
| | C/P | 220.57 | 294.75 | 240.73 | 23.68 |
| 根系 | C | 355.20 | 384.13 | 361.30 | 13.36 |
| | N | 13.99 | 14.60 | 14.24 | 15.58 |
| | P | 0.62 | 1.01 | 0.83 | 14.58 |
| | C/N | 24.79 | 27.16 | 25.30 | 25.22 |
| | N/P | 14.35 | 22.32 | 17.45 | 20.72 |
| | C/P | 356.28 | 582.37 | 446.11 | 17.62 |
| 土壤 | C | 8.36 | 9.69 | 9.00 | 6.52 |
| | N | 0.37 | 0.44 | 0.40 | 12.78 |
| | P | 0.69 | 0.74 | 0.72 | 4.46 |
| | C/N | 21.09 | 23.49 | 21.96 | 9.62 |
| | N/P | 0.52 | 0.62 | 0.57 | 11.61 |
| | C/P | 11.77 | 13.19 | 12.46 | 6.45 |

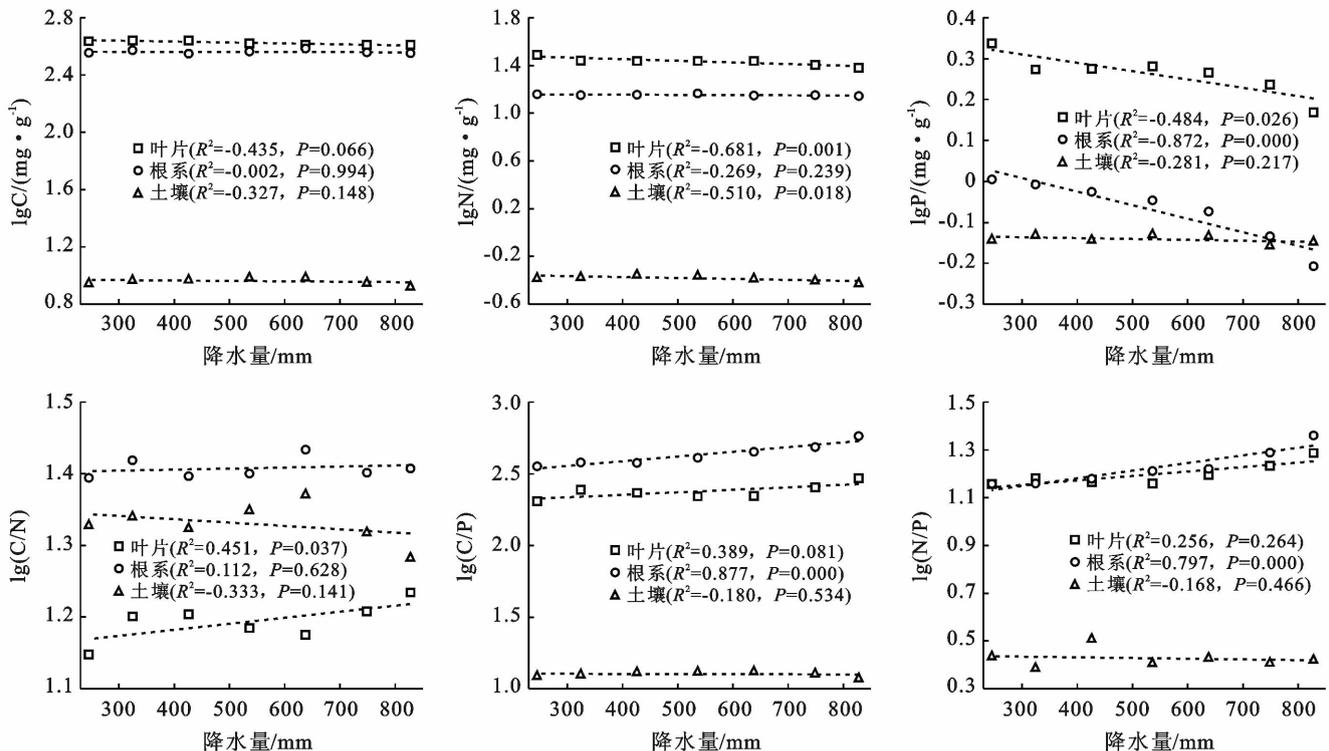


图 5 降水量与叶片、根系、土壤的养分含量相关性分析

植物通过根系从土壤中汲取生长所需的主要养分,同时通过光合作用固定碳源,产生有机物,并且以枯落物的形式返回土壤,再被植物重吸收,形成了一个有效的循环过程,因此生态系统的 C, N, P 含量具有一些关联性和差异性。随着降水梯度的变化,根系—叶片中 P 元素具有相关性(表 3),推测 P 元素有协同变化趋势,说明在黄土丘陵区植物体地上地下部分 P 元素利用效率有一定关系;根系—土壤方面, N, P 两种元素均有显著的相关性(表 3),这与袁志友^[13]土壤可利用 N, P 解释了细根 N, P 元素的 43%~75% 变

异的研究结果相一致;表明根系的化学计量学特征对土壤环境有着较高的依赖性,这与赵晓单^[15]植物根系的 C : N : P 化学计量特征受土壤的影响调控大于其自身的影响调控相一致。植物—土壤方面,随降水改变,仅仅 N 元素有着显著的相关性(表 3),与云南普洱地区^[14]常绿阔叶林生态系统中研究结果一致。说明黄土丘陵区土壤中 N 元素的供应量影响着植物体内的 N 含量,而 P 元素可能因物种差异而具有的选择性吸收的关系导致相关关系不显著,而具体关系有待于进一步研究确定。

表 3 植物叶片、根系与土壤化学计量特征的相关性分析

| 项目 | 养分 | 叶片 | | | 根系 | | | 土壤 | | |
|----|----|----|--------|--------|----|--------|--------|--------|----|---|
| | | C | N | P | C | N | P | C | N | P |
| 叶片 | C | 1 | | | | | | | | |
| | N | ns | 1 | | | | | | | |
| | P | ns | ns | 1 | | | | | | |
| 根系 | C | ns | ns | ns | 1 | | | | | |
| | N | ns | ns | ns | ns | 1 | | | | |
| | P | ns | ns | 0.546* | ns | ns | 1 | | | |
| 土壤 | C | ns | ns | ns | ns | ns | ns | 1 | | |
| | N | ns | 0.606* | ns | ns | 0.673* | ns | 0.542* | 1 | |
| | P | ns | ns | ns | ns | ns | 0.585* | ns | ns | 1 |

注: * 分别代表显著性水平小于 0.05; ns 代表显著性水平大于 0.05。

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 降水梯度对 C, N, P 含量的影响 在组成植物体的主要元素中, C 是组成植物体的结构性物质, N, P 则为功能性物质, 对于同一植物种而言, 功能性物质的 N, P 含量受环境影响变化较大, 结构性物质受环境的影响较小, C 含量相对较稳定^[15]; 本试验结果也印证了这一点, 在不同降水梯度处理下, 草地植物的叶片和根系的 C 含量均无显著差异, 而 N, P 含量则发生较大的变化; 表现出随着降水量的增加, 叶片和根系的 N, P 含量显著降低, 体现了水分的增加促进了植物的代谢能力和对养分的利用率, 减轻了 N, P 对植物生长的限制。Lü 等^[16]在内蒙古典型草地的试验研究表明, 水分添加对植物成熟叶片的全 N 含量没有影响, 但显著降低了全 P 含量; 而对荒漠草地植物短花针茅而言, 水分添加处理则提高了成熟期叶的 P 含量^[17]; 这些结果与本研究结果存在一定的差异, 这反映了各个功能群植物在大尺度水平上, 对同一气候环境的适应能力不同, 所表现的养分利用策略差异较大不同, 功能群植物叶片 C, N, P 含量及其计量比存在显著差异^[15]; 不同的植物具有灵活的自我

调节机制来适应生境因子的变动, 能够通过某些机制控制其对不同养分元素的吸收以维持体内的元素之间的平衡。

3.1.2 降水梯度对 C : N : P 化学计量特征的影响

植物叶片 N, P 含量特征与环境生物因子及非生物因子密切相关^[17], 叶片 C : N, C : P 代表了植物对氮磷元素的吸收利用能力^[18]。本研究的降水梯度对叶片的 C : N 和根系的 C : N, C : P 都存在显著的正相关关系; 而在各降水处理中, 叶片、根系和土壤的 C 含量均无显著变化, 叶片和土壤的 N 含量及叶片和根系的 P 含量都有随降水增加显著降低, 反映了水分与 N, P 间具有密切的交互作用, 水分可提高植物对 N, P 的利用能力; 相反, 在干旱胁迫下, 植物生理功能降低, 则通过从环境中吸收更多的养分和调节各器官养分分配来维持其稳定的生产力。N : P 是植物氮磷限制特征的关键指标^[19], 目前较多采用 Koerselman 等^[20]提出的 N : P 阈值来指示土壤养分状况, 即当植被叶片 N : P > 16 时, 植物生长受 P 限制; N : P < 14 时, 植物生长受 N 限制; 当 14 < N : P < 16 时, 植物的生长受 N 和 P 同时限制。本研究区草地植物叶片 N : P 在 14.4~19.38 mg/g 之间, 尽管植物叶片 N/P 随降水量变化并不显著 ($p > 0.05$), 但增雨 40%,

60%条件下,其 $N/P > 16$,表示受 P 限制,其他降水梯度下, $14 < N/P < 16$,证明植物生长可能同时受 N, P 两者的限制。这表明尽管降水改变对植物叶片 N/P 影响较小,但是仍然改变了草地群落的养分限制格局,即增雨 40%及以上,植物生长由同时受 N, P 两者的限制转为受 P 限制。体现草地生态化学计量特征对于降水变化的响应极为敏感^[21],水分是黄土丘陵草地植物对 N, P 利用的制约因子。

3.2 结论

叶片、根系和土壤 C, N, P 含量的平均值大小顺序均为:叶片 > 根系 > 土壤,三者的变异系数均小于 30%,属于轻度变异。其中不同降水梯度下叶片的 C 含量变异系数仅为 1.86%,表现出草地植物对 N, P 元素有较强的吸收利用能力。相关性分析表明,降水梯度与叶片的 N, P 含量和 C/N, 根系的 P 含量和 C/P, N/P, 土壤 N 含量存在显著相关性。植物体的叶片、根系、土壤之间也存在一定的相关关系。短期(一年)的降水处理对土壤的 C, N, P 含量及化学计量比影响不显著,但对植物叶片和根系的 N, P 存在显著的影响,体现了植物在水分胁迫下具有调控自身的 N, P 含量及其比值以适应环境的能力。此外,尽管降水改变对黄土丘陵区植物叶片 N/P 影响较小,但是仍然改变了草地群落的养分限制格局,随降水量增加,植物生长由同时受 N, P 两者的限制转为受 P 限制。

[参 考 文 献]

- [1] Ren Haiyan, Xu Zhuwen, Huang Jianhui, et al. Nitrogen and water addition reduce leaf longevity of steppe species [J]. *Annals of Botany*, 2011, 107(1): 145-155.
- [2] Huang Juying, Yu Hailong, Li Linghao, et al. Water supply changes N and P conservation in a perennial grass *Leymus chinensis* [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2009, 51(11): 1050-1056.
- [3] 徐柱. 面向 21 世纪的中国草地资源[J]. *中国草地*, 1998 (5): 2-9.
- [4] Jackson R B, Canadell J G, Ehleringer J R, et al. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes [J]. *Oecologia*, 1996, 108(3): 389-411.
- [5] 徐剑波, 宋立生, 彭磊, 等. 土壤养分空间估测方法研究综述[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(Z2): 1379-1386.
- [6] 郭曼, 郑粉莉, 和文祥, 等. 黄土丘陵区不同退耕年限植被多样性变化及其与土壤养分和酶活性的关系[J]. *土壤学报*, 2010, 47(5): 979-986.
- [7] 王凯博, 上官周平. 黄土丘陵区燕沟流域典型植物叶片 C, N, P 化学计量特征季节变化[J]. *生态学报*, 2011, 31 (17): 4985-4991.
- [8] 赵晓单, 曾全超, 安韶山, 等. 黄土高原不同封育年限草地土壤与植物根系的生态化学计量特征[J]. *土壤学报*, 2016, 53(6): 1541-1551.
- [9] Osmond C B, Austin M P, Berry J A, et al. Stress physiology and the distribution of plants [J]. *BioScience*, 1987, 37(1): 38-48.
- [10] Seligman N G, Sinclair T R. Global environment change and simulated forage quality of wheat (II): Water and nitrogen stress [J]. *Field Crops Research*, 1995, 40(1): 29-37.
- [11] 曾全超, 李鑫, 董扬红, 等. 陕北黄土高原土壤性质及其生态化学计量的纬度变化特征[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(5): 870-879.
- [12] 白春利, 刘永志, 王明玖, 等. 氮素和水分添加对荒漠草原短花针茅氮磷特征的影响[J]. *草业学报*, 2016, 25 (3): 251-256.
- [13] Yuan Zhiyou, Chen H Y H, Reich P B. Global-scale latitudinal patterns of plant fine-root nitrogen and phosphorus [J]. *Nature Communications*, 2011, 2(1): 344.
- [14] 刘万德, 苏建荣, 李帅锋, 等. 云南普洱季风常绿阔叶林演替系列植物和土壤 C, N, P 化学计量特征[J]. *生态学报*, 2010, 30(23): 6581-6590.
- [15] 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.
- [16] Lü Xiaotao, Cui Qiang, Wang Qingbing, et al. Nutrient resorption response to fire and nitrogen addition in a semi-arid grassland [J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(3): 534-538.
- [17] Dijkstra F A, Pendall E, Morgan J A, et al. Climate change alters stoichiometry of phosphorus and nitrogen in a semiarid grassland [J]. *New Phytologist*, 2012, 196 (3): 807-815.
- [18] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [19] Sabine G. N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance [J]. *New Phytologist*, 2004, 165(2): 243-226.
- [20] Koerselman W, Meuleman A F. The vegetation N : P ratio: A new tool to detect the nature of nutrient limitation [J]. *Journal of applied Ecology*, 1996, 33 (6): 1441-1450.
- [21] 刘海威. 黄土丘陵区草地群落生物学及生态化学计量学特征对降水改变的响应分析评价[D]. 陕西 杨陵: 中国科学院大学, 2018.