

黄土高原退耕还草土壤水分对植物地上部 化学计量特征的影响

靳小莲^{1,2}, 赵巍^{1,2,3}, 李梦迪², 刘栋栋², 鞠文亮^{3,4}

(1.西北农林科技大学 草业与草原学院, 陕西 杨凌 712100;

2.西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

3.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:揭示土壤水分含量变化对植物养分吸收的影响,对阐明草本植被对环境变化的响应和适应性具有重要意义,可为黄土高原区生态治理提供理论依据。研究以安塞纸坊沟流域不同退耕还草年限(6 a,15 a,25 a和45 a)的草本植物和0—50 cm深度土壤样品为研究对象,测定了植物地上部C,N,P,K,Ca和Mg含量及土壤含水率,并分析了植物养分含量及其生态化学计量与土壤含水率的关系。结果表明:土壤含水率随退耕还草过程呈先增加后降低趋势。植物体中C,N,K,Ca和Mg含量整体上随着退耕年限延长先降低后升高,植物P含量在退耕还草初期下降,中后期保持稳定。植物C/N,C/P和N/P比值随退耕年限呈先升高后降低的趋势,并且在退耕还草过程中植物生长主要受到N限制。植物Ca和Mg含量与土壤含水率呈显著负相关。另外,退耕45 a含水率最低,植物C/Ca,C/Mg,N/Ca,N/Mg,P/K,P/Ca,P/Mg比值也是最低的,表明植物可以增加吸收K,Ca和Mg以应对水分胁迫。研究表明土壤含水率随退耕还草过程降低,土壤水分降低促进干旱半干旱地区植被对环境的适应。研究结果为改善干旱半干旱区植被生态稳定性提供科学依据。

关键词:退耕还草;植物养分;生态化学计量比;土壤含水率;黄土高原

中图分类号:Q948.11

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)02-0057-07

Effects of Soil Moisture on the Stoichiometric Characteristics of Aboveground Plants Following Conversion of Farmland to Grassland on the Loess Plateau

JIN Xiaolian^{1,2}, ZHAO Wei^{1,2,3}, LI Mengdi², LIU Dongdong², JU Wenliang^{3,4}

(1.College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: It is important to reveal the influence of soil moisture content changes on plant nutrient uptake and to explain the response and adaptation of herbaceous vegetation to environmental changes, which can provide a theoretical basis for ecological management in the Loess Plateau. Herbs and soil samples in the depth of 0—50 cm in different grassland restoration ages (6 years, 15 years, 25 years, and 45 years) in Zhifanggou watershed in the hilly and gully region of the Loess Plateau were collected. The contents of C, N, P, K, Ca, and Mg in plants and the soil moisture contents were measured, and the correlation between plant nutrients and their ecological stoichiometry and soil moisture content was analyzed. The results showed that the soil moisture content increased firstly and then decreased following the conversion of farmland to grassland; the contents of C, N, K, Ca, and Mg in plants as a whole decreased firstly and then increased following the conversion of farmland to grassland; the P contents of plants decreased in the early stage of returning farmland

收稿日期:2021-02-25

修回日期:2021-03-16

资助项目:国家自然科学基金(41877037,41101218)

第一作者:靳小莲(1995—),女,陕西安康人,硕士研究生,主要从事草地土壤生态学研究。E-mail:xljin@nwfufu.edu.cn

通信作者:赵巍(1979—),男,湖北赤壁人,博士,副研究员,主要从事土壤环境化学研究。E-mail:aocai@nwfufu.edu.cn

to grassland and remained stable in the middle and late stages; the ecological stoichiometric ratios of plant C/N, C/P and N/P showed a trend of first increasing and then decreasing following the conversion of farmland to grassland, and the plants in the restored grassland were limited by N; Ca and Mg contents of plants were significantly negatively correlated with the soil moisture contents; additionally, farmland converted 45 years ago had the lowest soil moisture content, and the lowest ratios of C/Ca, C/Mg, N/Ca, N/Mg, P/K, P/Ca, P/Mg in plants. These results suggest that water stress induces plants to absorb K, Ca and Mg from soils to resist drought. This study found that soil water content decreases with the process of returning farmland to grassland, and the decrease of soil water promotes the adaptation of vegetation to the environment in arid and semi-arid areas. These research results can provide a scientific basis for improving the ecological stability of vegetation in arid and semi-arid areas.

Keywords: returning farmland to grassland; plant nutrient; ecological stoichiometry; soil moisture; Loess Plateau

黄土高原位于我国干旱半干旱区,是世界上水土流失最严重的区域之一,属于典型的生态脆弱区。由于社会的发展和人口的快速增长,人们不合理的耕作方式以及过度放牧,导致土地退化、水土流失,直接影响了当地的农业和工业生产力^[1]。研究表明,在半干旱区,自然植被恢复是固持水土,提高土壤养分和改善植被生态系统功能的有效措施^[1-3]。因此,为了缓解水土流失状况,从 1973 年开始,陕西纸坊沟流域开始实施造林种草综合治理以实现植被恢复,且此流域自 1999 年正式施行退耕还林(草)工程建设^[4]。退耕还草工程建设改变土地利用方式,不仅会影响植被群落物种组成,还会改变植物的养分含量^[3,5]。海旭莹等^[3]发现随着植被恢复年限(8~35 a)增加,植物地上部碳、氮和磷含量呈不断增加趋势。陆颖等^[6]在退耕恢复对半干旱黄土丘陵区植物养分影响的研究中发现,随着退耕年限(2~21 a)增加,植物群落地上部 C 含量呈现下降趋势, N 含量先减少后增加, P 含量无明显变化。另外,钾、钙、镁等矿质常量元素是植物生长基本的营养元素,对草地植被生态系统具有重要的生态学意义^[7]。然而,目前多数研究都集中在植被恢复对植物 C, N, P 含量的影响,却忽略 K, Ca, Mg 等元素对植被恢复系统中植物生产力的贡献^[8-9]。植物计量比不仅是影响植物群落生长、植被群落多样性以及群落演替等特征的关键因素,还可以判断植物养分限制状况和植被对外界环境的适应能力,进一步揭示植物对养分的利用效率^[3,10]。生态化学计量比已经逐渐成为植物养分限制评估的主要方法,可以为退耕还林草植被的合理配置提供科学依据^[11]。

半干旱区水分短缺不仅限制了植物的生长,还改变了土壤养分的有效性,进而影响着植被生长的养分限制状况^[12]。半干旱区草地生物量的空间变异与土壤水分

有很大的相关性,且土壤水分对植被生产力和物种多样性都有较大的影响^[13]。在黄土高原地区,大部分情况下水分只能通过降雨来补充,年均降雨量较少,而蒸发量较高,土壤水分有效性较低,使得水分在该地区植被群落组成和分布中起着重要的角色^[14-15]。另外,不同深度土壤水分对黄土高原丘陵区植被恢复过程中植被选择具有指导依据^[16]。水分是维持半干旱区域生态系统可持续的重要因素,然而目前针对黄土高原丘陵区土壤水分对植物养分及养分限制方面开展的研究相对较少^[17]。因此,了解黄土高原退耕还草过程中土壤水分变化以及对植物养分和养分限制的影响,对干旱半干旱区的植被恢复重建和水土流失治理有重要意义。本研究以黄土高原丘陵区不同退耕还草恢复年限的草地植被及土壤样品为研究对象,研究退耕还草过程中土壤水分含量对植物养分含量变化及其计量特征的影响,以此阐明黄土高原退耕还草植被的生态恢复机制,以为黄土高原退化土地生态管理提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市安塞纸坊沟流域(109°13'03"—109°16'46"E, 36°46'28"—36°46'42"N)。该流域属于暖温带半干旱气候,海拔 1 246~1 273 m,年降雨量为 549.1 mm,降雨主要集中在 7—9 月份,占全年降雨量的 60%。流域内主要以黄土发育的黄绵土为主,且土壤质地主要是粉砂粒,结构疏松。纸坊沟流域处于森林草原带,植被恢复措施实施前植物稀少,水土流失严重。流域植被多样性和土壤质量在 1973 年以来的植被恢复综合治理中得到了明显的改善。该流域草本植物优势物种包括茼蒿(*Artemisia giraldii*)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、阿尔泰狗

娃花(*Heteropappus altaicus*)、胡枝子(*Lespedeza philippica*)、白羊草(*Bothriochloa ischemum*)和冰草(*Agropyron cristatum*)等^[18]。

表 1 纸坊沟流域退耕还草地基本信息

退耕年限/a	地理位置	坡度/(°)	海拔/m	优势物种	其他物种
6	36°45'40.1"N 109°14'58.1"E	29.5	1246	铁杆蒿(<i>Artemisia gmelini</i>)	狗尾草、中花影子草、赖草、芨蒿、胡枝子、黄鹌菜
15	36°44'33.5"N 109°14'31.3"E	19.5	1266	赖草(<i>Leymus secalinus</i>)、 茵陈蒿(<i>Artemisia capillaris</i>)	野老鹳草、狗尾草、田菊、硬枝早熟禾、长芒
25	36°44'35.9"N 109°14'28.9"E	15.5	1272	芨蒿(<i>Artemisia giraldii</i>)	长芒、胡枝子、刺儿菜、黄芪、野豌豆、铁杆蒿、黄鹌菜、 鹅冠草、胡枝子
45	36°44'38.6"N 109°14'32.9"E	24.5	1273	蒙古蒿(<i>Artemisia mongolica</i>)	长芒、青蒿、胡枝子

1.2 样品采集

根据文献查阅与居民走访,于 2018 年 9 月采集植物和土壤样品。选取流域内不同退耕年限的自然恢复草地(分别退耕还草 6 a, 15 a, 25 a 和 45 a),所选取样地都在半阳坡,样地具体信息见表 1。分别在每个样地建立 3 个 1.0 m × 1.0 m 的植物样方,收集样方内的所有植物,记录优势物种,带回实验室 105℃ 杀青 15 min 后,在 65℃ 烘干以备后续分析。分别在研究样地随机选取 3 个土壤样品采集点,小心去除表土凋落物后,采用土钻采集 0—50 cm 土壤样品(深度间隔 10 cm)用于含水率测定。

1.3 样品测定

植物地上部样品用粉样机粉碎后过 0.15 mm 筛,测定植物全量 C, N, P, K, Ca 和 Mg 含量。C 含量测定使用重铬酸钾外加热法; N, P 和 K 使用 H₂SO₄—H₂O₂ 消解后定容,分别用流动分析仪测定 N 和 P,原子吸收火焰光度计法测定 K; Ca 和 Mg 用 HNO₃—HClO₄ 消解后定容,用原子吸收火焰光度计法测定 Ca 和 Mg。用烘干法测定土壤样品含水率,在 105℃ 下烘 24 h 以获得不同深度土壤样品的含水率^[19]。

1.4 数据处理与分析

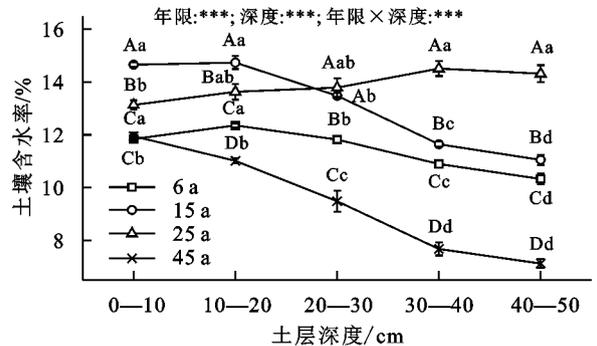
数据分析采用 SPSS 22.0,不同处理使用单因素方差分析(One-Way ANOVA),数据采用 Duncan 法进行多重比较,其显著性水平为 $p < 0.05$ 。使用 Origin Pro 2021 绘制柱状图和折线图,使用 R 2.6.0 绘制相关性热图和主成分分析(PCA)。

2 结果与分析

2.1 土壤含水率变化

由图 1 可知,土壤含水率显著受退耕年限和土层深度影响。0—20 cm 土层含水率随退耕年限增加呈先增加后降低趋势,退耕 15 a 达到最大值,含水率均值大小顺序为:15 a(14.7%) > 25 a(13.4%) > 6 a(12.1%) > 45 a(11.5%)。在 20—50 cm 土层,含水

率随退耕年限也呈先增加后降低趋势,退耕 25 a 的含水率最高,含水率均值大小顺序为:25 a(14.1%) > 15 a(12.1%) > 6 a(11.0%) > 45 a(8.1%);随着土层深度增加,退耕 25 a 样地土壤含水率随呈增加趋势,而其他样点呈现下降趋势。



注:不同大写字母代表同一退耕年限下不同土层深度间的差异($p < 0.05$),不同小写字母代表同一土层深度下不同退耕年限间的差异($p < 0.05$)。

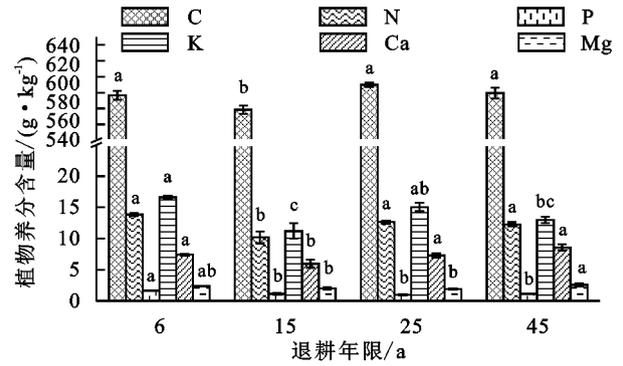
图 1 退耕还草过程土壤含水率的变化

2.2 植物养分含量及化学计量比

由图 2 可知,随着退耕还草年限增加,植物 C 含量先降低后增加($p < 0.05$),在退耕 25 a 含量最高,15 a 最低,其含量变化范围为 559~590 g/kg,高于全球植物 C 含量平均水平(464 g/kg)。植物 N 含量变化趋势与 C 相似,含量变化范围为 10.2~13.8 g/kg。P 含量在退耕初期呈下降趋势($p < 0.05$),退耕中后期保持稳定,含量变化范围为 1.0~1.6 g/kg; K 含量变化极不稳定,随退耕年限呈先降低后增加,随后保持稳定的趋势, K 含量的变化范围为 10.1~15.7 g/kg; Ca 含量随退耕年限呈先减少后增加的趋势,退耕 15 a 为最低值,含量变化范围为 5.98~8.60 g/kg; Mg 含量随退耕年限先降低后升高($p < 0.05$),含量变化范围 1.72~2.57 g/kg。

由表 2 看出,植物 C/N 随退耕年限呈现先增加后降低的趋势,均值为 48.3,其中退耕 15 a 为最高值(57.2),6 a 最低(41.7); C/P 和 N/P 随退耕年限呈先增加后降低的趋势,均值分别为 491, 10.2, 其中退耕

25 a 为最高值,6 a 最低。植物 C/K 和 N/K 随退耕年限呈先增加后降低,随后又增加的趋势,均值分别为 43.07,0.89,退耕 6 a 为最低值。植物 C/Ca 和 C/Mg 随退耕年限延长先升高后降低,其均值分别为 82.0,272,退耕中期(15 a 和 25 a)达到最大值,退耕 6 a 为最低值。植物 N/Ca 和 N/Mg 随退耕年限的变化趋势为先降低后升高,随后又下降,其均值分别为 1.70,5.67,退耕 45 a 为最低值。植物 P/K,P/Ca 和 P/Mg 随退耕年限呈降低趋势,均值为 0.09,0.17,0.57,退耕 6 a 为最大值,45 a 为最低值。



注:不同字母代表同一养分不同退耕年限间的差异($p < 0.05$)。

图 2 退耕还草过程植物养分含量变化

表 2 植物养分化学计量

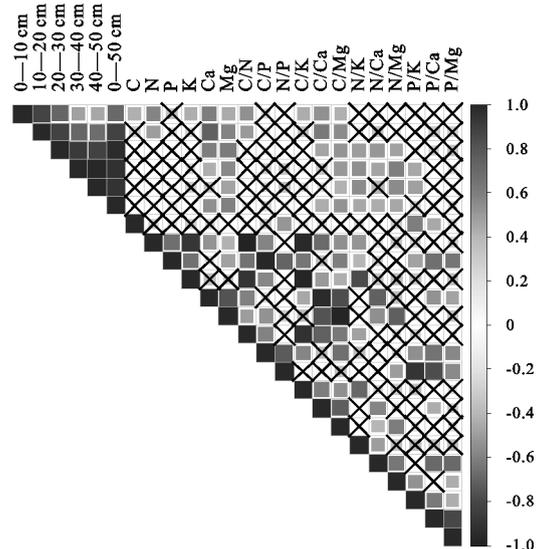
退耕年限/a	C/N	C/P	C/K	C/Ca	C/Mg	N/P	N/K	N/Ca	N/Mg	P/K	P/Ca	P/Mg
6	41.7±1.03b	354±14.9c	34.7±0.40c	77.9±1.78b	244±4.97b	8.46±0.15c	0.83±0.01b	1.87±0.03a	5.86±0.10ab	0.10±0.00a	0.22±0.01a	0.69±0.02a
15	57.2±5.23a	501±45.0b	52.9±5.80a	99.7±12.2a	298±34.2ab	8.76±0.07c	0.92±0.03a	1.73±0.09a	5.17±0.21b	0.10±0.03a	0.20±0.01a	0.59±0.02b
25	46.8±0.84b	608±45.6a	39.6±1.80bc	82.0±3.94ab	310±13.2a	13.0±0.77a	0.85±0.03b	1.75±0.08a	6.62±0.20a	0.07±0.02b	0.14±0.01b	0.52±0.02bc
45	47.4±1.53b	502±11.8b	45.1±2.01ab	68.5±3.90b	234±19.9b	10.6±0.15b	0.95±0.01a	1.46±0.12b	5.02±0.55b	0.09±0.03b	0.14±0.01b	0.47±0.05c

注:不同字母表示不同退耕年限间显著性差异($p < 0.05$)。

2.3 土壤水分与植物养分之间的关系

如图 3 所示,0—10 cm 土层含水率与植物 C 和 K 含量呈显著负相关($p < 0.05$),而 10—50 cm 土层含水率与 C 和 K 含量无显著相关性。0—20 cm 土层含水率与植物 N 含量呈显著负相关,而 20—50 cm 土层含水率与 N 含量无显著相关性。在退耕还草过程中,土壤含水率对植物 P 含量的影响很小,却显著影响植物 Ca 和 Mg 的含量。土壤含水率总体上与 Ca,Mg 含量呈显著负相关。0—50 cm 土层平均含水率与植物 C,N,P,K 含量无显著相关性,而与 Ca,Mg 含量呈显著负相关。另外,仅 0—20 cm 土层含水率与植物 C/N 值呈显著正相关,而 20—50 cm 土层含水率与植物 C/N,C/P 和 N/P 比值无显著相关性,C/Ca,C/Mg,N/Ca 和 N/Mg 在不同土层与含水率呈正相关,而 P/Ca,P/Mg 比值与含水率相关性较弱,N/K 和 P/K 在亚土层与含水率有显著负相关性。

不同退耕还草年限间的土壤含水率和植物养分含量具有明显的差异(图 4),其结果将退耕过程大致分为 3 个阶段,退耕 6 a 为第一阶段,退耕 15 a 和退耕 25 a 为第二阶段,退耕 45 a 为第三阶段。PCA 分析也表明 0—20 cm 土层含水率对植物 C,N,P 含量的影响较大,而 20—50 cm 土层含水率对植物这些养分含量的影响较小。土壤含水率与植物 Ca,Mg 相关的养分化学计量比呈正相关关系,0—20 cm 土层含水率与 C/Ca,C/Mg 相关性较强,而 30—50 cm 土层含水率与 N/Ca,N/Mg,P/Ca 和 P/Mg 相关性较强。



注:0—10 cm,10—20 cm,20—30 cm,30—40 cm,40—50 cm 分别表示不同深度土壤含水率;0—50 cm 表示 0—50 cm 土壤含水率平均值。×表示相关性不显著, $p > 0.05$ 。

图 3 土壤含水率与植物养分含量及其生态化学计量比之间的相关性

3 讨论

黄土高原退耕还草会改变植被覆盖度和土壤理化性质,进而影响土壤含水率^[20]。本研究发现相较于退耕还草 6 a,退耕 15 a 和 25 a 增加了土壤含水率,而退耕 45 a 却减少了土壤含水率。在退耕还草中期,植物群落的多样性、群落盖度、土壤孔隙度和土壤结构稳定性皆增加,地表径流减少,从而土壤含水率增加^[3,21]。但在退耕还草后期,植被群落出现优势

物种,导致植被多样性降低^[3]。另外,由于退耕还草后期植被生物量增加^[22],从而植物蒸腾作用增加,进而导致土壤含水率降低。李婧等^[23]发现黄土高原丘陵沟壑区阳坡 0—60 cm 土层水分含量在退耕还草 3~40 a 的过程中呈先增加后减少的趋势。退耕还草过程中表层土壤含水率高于底层,这与半干旱地区土壤剖面水分普遍存在的“上高下低”现象一致^[24],这可能是由于本研究的取样时间处于区域降水量较多的季节,土壤表层温度降低,蒸发量少,导致表层水分蓄积增加。

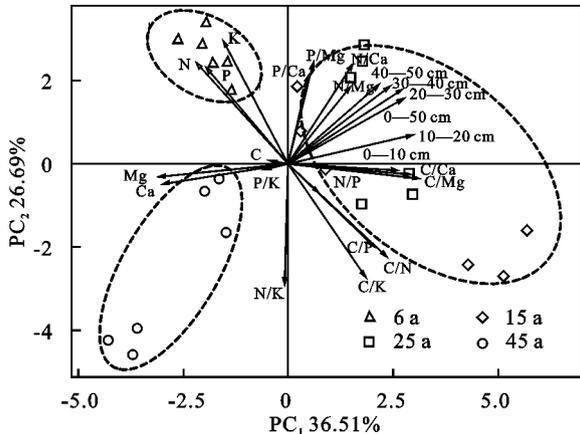


图 4 土壤含水率与植物养分的 PCA 分析

研究退耕还草过程中植物养分含量变化对分析草地生态系统物质循环和可持续发展具有重要意义^[6,25]。由于研究区的优势植被皆为浅根系草本植物,因此在退耕还草过程中,表土层(0—20 cm)含水率决定了植物地上部不同养分元素含量变化趋势。随着退耕还草年限增加,植物 C 含量先降低后增加,可能是由于相对于退耕 6 a,退耕 15 a 的 0—10 cm 土层土壤含水率增加,植物的生存策略由获取逐渐变为保守策略^[26],从而植物碳含量减小;退耕还草中后期(25 a 和 45 a),表土层(0—20 cm)土壤含水率,较退耕 15 a 显著降低,此时植物生长受到胁迫,为维持自身生长,植物根系不断伸长,向深层土壤吸收水分和养分^[27],养分 N 吸收增加促进植物光合作用^[28],使植物 C 含量增加。另外,土壤水分减少,植物生长受到限制时,为抵抗干旱胁迫,植物将增加淀粉、葡萄糖等物质的合成,加强植物固碳,从而使植物含 C 量增加^[29]。N 和 P 共同参与植物生命体构建,是植物生长必需的大量元素,直接影响植物的生长发育^[11]。退耕还草土壤中氮来源于动植物残体分解及生物固氮作用^[30],植被通过不断吸收土壤氮素供自身生长,因而植被 N 含量在退耕中后期(25 a 和 45 a)增加。另外,植被恢复后期,土壤水分减少,植物生长受到限

制时,为抵抗干旱胁迫,植物组织会增加 N 输入,通过调节植物细胞渗透压来降低水分损失^[12],从而使植物 N 含量增加。而退耕 15 a 样地中植物 N 含量低于其他退耕样地,可能是由于该阶段土壤水分较充足,样地植被形成多种优势物种,不同物种间其 N 含量会产生一定差别^[31]。相比其他退耕后草地的优势物种仅为菊科植物,退耕 15 a 样地的优势物种不仅有菊科茵陈蒿,还有禾本科赖草,据报道,双子叶的菊科植物 N 含量一般高于单子叶的禾本科植物^[32]。因此,退耕 15 a 样地中植物 N 含量低于其他退耕样地。磷是由岩石风化而来,在自然植被恢复过程中,土壤中的磷元素不断被植物吸收,且没有外源磷输入土壤,所以导致在长期的退耕还草过程中,植物可吸收的磷元素逐渐减少,植物 P 含量降低。随着退耕还草年限增加,植物 K 含量先降低后增加,表明在植被恢复初期,植被生长旺盛,钾素供应不足,但在植被恢复后期,土壤含水率降低,植物为抵抗水分胁迫,自动调节自身,最大限度的吸收 K^[11,33],通过调节植物细胞渗透压、参与酶的调控、控制植物叶片气孔、提高根系水传力等作用,从而提高植物的抗旱性^[34]。在退耕还草过程中,植物 Ca 含量呈先降低后升高的趋势,这可能是随着退耕年限的增加,土壤含水率降低,从而抑制了植物的生长,植物为了缓解水分胁迫,增加对土壤 Ca 的吸收,Ca 不仅是植物细胞壁的组成成分,更是联结细胞内外生理生化反应的第二信使,可提高植物对干旱环境的抗性^[35-36]。退耕还草过程中,植物 Mg 含量变化趋势与 Ca 一致,其可能的原因:一方面,Mg 的吸收增加可增强植物的抗旱能力^[33];另一方面,Mg 参与叶绿素的形成,促进植物光合作用进程顺利完成^[36],使植物在水分胁迫下维持正常的生长。因此,植物 K,Ca 和 Mg 含量都与抵抗干旱环境息息相关^[34-36]。

生态化学计量比是维持植物生长和相关生态系统功能的基础^[3,10]。植物生长过程中,所含养分应维持相对稳定的比例,最佳比值可促进植物快速生长,如果计量比值偏离一定范围,就意味着某种营养元素受限制^[31,36]。通常将 N/P 值小于 14 认为是植物生长受到氮限制,而 N/P 值大于 16 受磷限制,介于 14~16 之间是受到氮和磷共同限制^[37]。本研究发现,随着退耕时间增加,N/P 先增加后降低,在 25 a 达到最大值,其范围在 8.50~13.7 之间,所有年限 N/P 值都低于 14,表明退耕还草过程中,植被生长一直受到氮限制。这与李鑫等^[11]对纸坊沟流域草本植

物 N/P 研究结果一致,植被生长旺盛期的草本植物受到 N 限制。草本植物属于浅根系植物,植物和土壤磷通常在相同的生态系统尺度上是耦合的,且表土层磷素含量高于底土层^[38],草本植物根系极易吸取表层土壤中磷素供自身生长发育;其次,磷素为可移动养分,其在叶片凋落前将由枯叶转移至新鲜组织中储存,因此导致较低的 N/P。植物 C/N 和 C/P 可以在一定程度反映植物同化碳的能力,具有重要的生态学意义^[8]。本研究发现,在黄土高原丘陵区实施退耕还草措施使得植物 C/P(491.3)高于全球水平(232),C/N(48.3)亦高于全球水平(22.5)。退耕还草过程中,C/N随退耕时间呈先增加后降低的趋势,其退耕中期比值较高,即植物对 N 的吸收低于对 C 的吸收,表明退耕早中期植物对氮素的利用效率较低;而退耕后期植被恢复 C/N 降低,这可能是相较于植被恢复中期,后期土壤含水率降低,干旱环境启动植物自身保护机制,促使植物氮吸收增加^[12]。研究发现,不同时期植物养分对水分的敏感度不同。随着土壤水分降低(退耕 15 a \geq 退耕 25 a $>$ 退耕 6 a $>$ 退耕 45 a),植物 C、N 和 P 与碱性阳离子的比值整体上呈降低趋势。退耕初期,植物生长量较少,虽然土壤含水率较低,但可满足植物的生长需求,此时植物大量吸收 N 和 P, N 和 P 吸收的增加量大于 K、Ca 和 Mg 的吸收量,从而退耕 6 a 有较高 N/Ca、N/Mg、P/K、P/Ca、P/Mg 比值。退耕后期,土壤表层含水率较中期(15 a)显著减小,植物根系吸收深层土壤养分和水分以维持其生长,导致植物养分元素含量整体呈增加趋势(C、N 显著增加,P 变化不显著),另一方面,植物为抵御水分胁迫,增加 K、Ca 和 Mg 的吸收^[36],并且 K、Ca 和 Mg 的吸收量大于养分元素的吸收量,因此退耕 45 a 的 C/Ca、C/Mg、N/Ca、N/Mg、P/K、P/Ca、P/Mg 均为最低值。

4 结论

(1) 随退耕年限增加,土壤含水率整体上呈先增加后减少趋势,退耕 15 a 为拐点;土壤含水率随着土层深度增加而下降,而退耕 25 a 呈增加趋势,表明退耕年限是影响土壤含水率的关键因素之一,选择适当的退耕年限有利于提高黄土高原丘陵区草地持水量。

(2) 随退耕年限增加,植物中常量和中量元素 C、N、K、Ca 和 Mg 整体上皆呈先降低后增加的变化趋势,P 含量在退耕前期降低,后期维持稳定,表明长期退耕还草措施可增加植物的养分含量,有利于提高植被群落的生态功能。

(3) 黄土高原丘陵区植物 C/N、C/P 和 N/P 随退耕年限表现出先增加后降低的趋势,C/N 在退耕 15 a 达到最大值,而 C/P 和 N/P 在退耕 25 a 达到最大值,且该地区植物生长主要受到 N 限制。植物 C/Ca、C/Mg、N/Ca、N/Mg、P/K、P/Ca、P/Mg 均在退耕 45 a 为最低值,表明长期干旱条件会促使植物对碱性阳离子的吸收。

(4) 土壤表层含水率与植物养分呈现显著的负相关,较低的水分可促进植物吸收 K、Ca 和 Mg 以提高植物的抗旱性;土壤水分通过影响植物养分分布改变植物的生态化学计量,进而影响植被群落的生态稳定性。

参考文献:

- [1] 鞠文亮.禁牧对半干旱草原土壤团聚体稳定性及微生物特征的影响[D].北京:中国科学院大学(水土保持与生态环境研究中心),2020.
- [2] Tao W H, Wang Q J, Guo L, et al. A new analytical model for predicting soil erosion and nutrient loss during crop growth on the Chinese loess plateau[J]. *Soil & Tillage Research*, 2020,199:1-12.
- [3] 海旭莹,董凌勃,汪晓珍,等.黄土高原退耕还草地 C、N、P 生态化学计量特征对植物多样性的影响[J].*生态学报*,2020,40(23):199-210.
- [4] Zhang L, Zhao W, Zhang R, et al. Profile distribution of soil organic and inorganic carbon following revegetation on the Loess Plateau, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018,25:30301-30314.
- [5] Halada L, David S, Hreško J, et al. Changes in grassland management and plant diversity in a marginal region of the Carpathian Mts. in 1999-2015[J]. *Science of the Total Environment*, 2017,609:896-905.
- [6] 陆颖,王保林,沈艳.宁夏典型草原区不同退耕年限草地植物群落及优势植物 C、N、P 化学计量特征[J].*草业科学*,2019,36(5):1200-1206.
- [7] 李天才,陈桂琛,曹广民,等.青海湖北岸退化草地和封育草地中钾、钙、镁等矿质常量元素特征[J].*草地学报*,2011,19(5):752-759.
- [8] Fay P A, Prober S M, Harpole W S, et al. Grassland productivity limited by multiple nutrients[J]. *Nature Plants*, 2015,1(7). DOI:10.1038/NPLANTS.2015.80.
- [9] Han W X, Fang J Y, Reich P B, et al. Biogeography and variability of eleven mineral elements in plant leaves across gradients of climate, soil and plant functional type in China[J]. *Ecology Letters*, 2011,14(8):788-796.
- [10] 宋晓倩,张衷华,唐中华.分类学、生活型及土壤特性对温带荒漠植物叶元素浓度的影响[J].*干旱区研究*,2020,37(5):1264-1272.

- [11] 李鑫,曾全超,安韶山,等.黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究[J].环境科学,2015,36(3):1084-1091.
- [12] 刘冬,张剑,包雅兰,等.水分对敦煌阳关湿地芦苇叶片与土壤C, N, P生态化学计量特征的影响[J].生态学报,2020,40(11):261-269.
- [13] 常学尚,常国乔.干旱半干旱区土壤水分研究进展[J].中国沙漠,2021,41(1):156-163.
- [14] 张永旺,万珊珊,王俊,等.黄土高原植被演替过程中土壤水分亏缺[J].水土保持研究,2020,27(5):120-125,132.
- [15] Wang L, Wang X, Chen L, et al. Trade-off between soil moisture and species diversity in semi-arid steppes in the Loess Plateau of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 750. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141646.
- [16] 杨磊,张子豪,李宗善.黄土高原植被建设与土壤干燥化:问题与展望[J].生态学报,2019,39(20):7382-7388.
- [17] Luo Y P, El-Madany T, Ma X L, et al. Nutrients and water availability constrain the seasonality of vegetation activity in a Mediterranean ecosystem[J]. *Global Change Biology*, 2020,26(8):4379-4400.
- [18] Ye L P, Tan W F, Fang L C, et al. Spatial analysis of soil aggregate stability in a small catchment of the loess plateau, China: II. Spatial prediction[J]. *Soil & Tillage Research*, 2019,192:1-11.
- [19] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [20] 赵佰礼,穆兴民,高鹏,等.黄土丘陵沟壑区不同退耕草地土壤水分研究[J].水土保持研究,2019,26(4):111-115.
- [21] 冯璐.黄土丘陵沟壑区撂荒草地土壤性质变化特征研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [22] 贾昭,简春霞,熊沛枫,等.黄土丘陵区退耕草地群落盖度与地上生物量关系[J].水土保持研究,2020,27(1):325-333.
- [23] 李婧,李占斌,李鹏,等.黄土高原丘陵沟壑区退耕生态系统土壤水分动态变化规律研究[J].水土保持研究,2009,16(5):153-156.
- [24] 胡良军,邵明安.黄土高原植被恢复的水分生态环境研究[J].应用生态学报,2002,13(8):1045-1048.
- [25] 邓蕾.黄土高原生态系统碳固持对植被恢复的响应机制[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2014.
- [26] 张剑,包雅兰,宿力,等.敦煌阳关湿地芦苇叶性状对土壤水分的响应[J].生态学报,2019,39(20):7670-7678.
- [27] He M, Dijkstra F A. Drought effect on plant nitrogen and phosphorus: A meta-analysis[J]. *New Phytologist*, 2014,204(4):924-931.
- [28] Gower S T, Mcmurtrie R E, Murty D. Aboveground net primary production decline with stand age: potential causes[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 1996,11(9):378-382.
- [29] 杨斌,彭长辉,张贤,等.干旱胁迫对刺槐幼苗叶片氮含量、光合速率及非结构性碳水化合物化合物的影响[J].应用与环境生物学报,2019,25(6):1261-1269.
- [30] 欧延升,汪霞,李佳,等.不同恢复年限人工草地土壤碳氮磷含量及其生态化学计量特征[J].应用与环境生物学报,2019,25(1):38-45.
- [31] Han W X, Fang J Y, Guo D L, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. *New Phytologist*, 2005,168(2):377-385.
- [32] 张文彦,樊江文,钟华平,等.中国典型草原优势植物功能群氮磷化学计量学特征研究[J].草地学报,2010,18(4):503-509.
- [33] 张海东,汝海丽,焦峰,等.黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落土壤C, N, P, K化学计量学特征[J].环境科学,2016,37(3):1128-1138.
- [34] Sardans, Jordi, Penuelas, et al. Potassium: a neglected nutrient in global change[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2015,24(3):261-275.
- [35] Zhang K R, Cheng X S, Dang H S, et al. Biomass: N : K : Ca : Mg : P ratios in forest stands world-wide: Biogeographical variations and environmental controls[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2020,29(12):2176-2189.
- [36] Tian D S, Reich P B, Chen H Y H, et al. Global changes alter plant multi-element stoichiometric coupling[J]. *New Phytologist*, 2019,221(2):807-817.
- [37] Aerts R, Chapin F S. The mineral nutrition of wild plants revisited: A re-evaluation of processes and patterns[J]. *Advances in Ecological Research*, 1999,30:1-67.
- [38] 韩馥,王百群,张尚鹏,等.子午岭植被对土壤团聚体及磷素分布的驱动作用[J].水土保持研究,2019,26(5):124-128.