

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3142.2014.04.007

李恩宇,何贵永. 青藏高原高寒草甸不同季节土壤理化性质及酶活性对施肥处理的响应[J]. 广西植物, 2014, 34(4):467-472

Li EY, He GY. Tibetan Plateau alpine meadow soil properties and enzyme activity in response to fertilization gradients in different seasons[J]. *Guihaia*, 2014, 34(4):467-472

青藏高原高寒草甸不同季节土壤理化性质及酶活性对施肥处理的响应

李恩宇¹, 何贵永^{2*}

(1. 广东省建科建筑设计院, 广州 510000; 2. 兰州大学 草地与农业生态系统国家重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 分析了青藏高原东缘高寒草甸不同施肥处理对土壤全量养分、速效养分、pH、含水量、有机碳和土壤脲酶活性的影响,以揭示高寒草甸土壤养分和酶活性对施肥的响应。结果表明:(1)随施肥量的增加,土壤 pH 明显趋于降低,施肥引起高寒草甸土壤酸化;全磷、速效磷均显著增大;(2)土壤全氮、有机碳和脲酶活性随施肥量增加呈单峰曲线变化,在施肥量为 30 或 60 g·m⁻²时最高,施肥量增加到 90 g·m⁻²时土壤资源逐渐降低;(3)季节变化对土壤养分也有一定的影响,全氮和全磷含量均于 9 月份较高,而速效氮含量一般于 9 月份较低,而速效磷含量 5 月份较低;(4)施肥对土壤养分的影响并不是简单的线性正相关关系,30~60 g·m⁻²施肥量可作为高寒草甸最佳施肥水平。施肥处理下土壤有机碳和脲酶活性可作为衡量土壤肥力和土壤质量变化的重要指标。高施肥量(≥90 g·m⁻²)可作为影响高寒草甸土壤养分及土壤酶活性的阈值。

关键词: 青藏高原; 高寒草甸; 施肥梯度; 土壤理化性质; 土壤酶活性

中图分类号: Q948.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2014)04-0467-06

Tibetan Plateau alpine meadow soil properties and enzyme activity in response to fertilization gradients in different seasons

LI En-Yu¹, HE Gui-Yong^{2*}(1. *Jianke Architecture Design Institute of Guangdong Province, Guangzhou 510000, China*; 2. *State Key Laboratory of Grassland and Agro-Ecosystems, School of Life Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: Different fertilization gradients affect to the soil total nutrient, available nutrients, pH, water content, organic carbon and soil urease activity in alpine meadow in Maqu area were studied. To reveal the alpine meadow soil nutrient and enzyme activity in response to fertilization gradients. The results were as follows: (1) With the increase of fertilization gradients, soil pH tended to reduce obviously, fertilizing caused soil acidification in grassland ecosystem, total phosphorus and rapid available phosphorus increased obviously as the increase of fertilization gradients; (2) Soil total nitrogen, organic carbon and urease activity changed as a single peak curve as the increase of fertilization gradients. It was higher in the fertilizer gradients of 30 or 60 g·m⁻², and the soil resources gradually reduced in the fertilizer gradient of 90 g·m⁻²; (3) Seasonal variation had a certain influence on soil nutrients, total nitrogen and total phosphorus content were higher in September, The available nitrogen content was generally lower in September, available phosphorus was lower in May; (4) The influence of fertilizer application on soil nutrients was not simple linear positive

收稿日期: 2014-02-16 修回日期: 2014-06-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41171214); 国家自然科学基金(41171046)。

作者简介: 李恩宇(1978-), 女, 吉林长春人, 从事森林资源保护与游憩等研究, (E-mail)63949199@qq.com。

*通讯作者: 何贵永, 硕士研究生, 主要从事土壤生态学等研究, (E-mail)hegy11@lzu.edu.cn。

correlation. The fertilization gradients of $30-60 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ could be used as the best fertilizer levels in alpine meadow. Soil organic carbon and urease activity could be used as the important indicators to measuring soil fertilizer and soil quality in fertilization gradients. High rate of fertilization ($\geq 90 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) can be regarded as the threshold to effect the structure and function in alpine meadow, soil nutrient and soil enzyme activity.

Key words: Tibetan Plateau; alpine meadow; fertilization gradients; soil properties; soil enzyme activity

玛曲县位于青藏高原东缘,甘、青、川三省交界地带,是黄河上游重要水源补给区,每年补充黄河水量约占黄河总水量的 45%,被誉为“黄河之肾”,也是天然的绿色屏障(张志强等,2000)。然而,由于长期超载过牧等不合理利用,该地区草地退化、沙化日趋严重,生态系统稳定性降低(Zhou *et al.*, 2006)。生产力不断下降,从根本上制约了该地区经济的发展,同时破坏了当地草地植被的自然生态系统和社会经济系统。草地退化的原因十分复杂,但从生态系统学理论的观点来看,其本质上是由于草地生态系统中能量流动和物质循环失衡、人不敷出造成的(王长庭等,2013)。人类在利用草地时(刈割等)土壤养分随着草产品及畜产品的输出被过量地带出草地,在未得到有效补充情况下,草地土壤肥力逐渐下降,甚至瘠薄,严重影响牧草的生长,草地生态系统严重退化。高寒草甸生态系统退化不仅表现在物种数减少、能量的分配转向地下等(王长庭等,2008);也表现在土壤肥力、土壤质量和酶活性的降低等(王长庭等,2008;王启兰等,2011)。

草地施肥是一种维持草地生态系统养分平衡的重要管理措施,草地施肥能够补充土壤营养物质,有助于草地生产力的恢复和提高(Wang *et al.*, 2010)。杜国祯等(1995)的研究表明,缺磷是导致草地退化的主要养分限制因素;改良初期氮肥的施用有助于提高磷肥肥效。本项研究通过采用不同梯度的氮、磷混施处理。但青藏高原东缘高寒草甸维持土壤资源最大化的氮、磷施肥量是多少,施肥量与土壤理化性质之间是何种相互关系,鲜为人知。因此,本研究通过施肥梯度试验研究分析氮、磷增加对高寒草甸土壤全量养分、速效养分及土壤有机碳和酶活性的影响,以及土壤养分和土壤酶活性的季节变化,为青藏高原东缘高寒草甸的适应性管理提供基础科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区自然概况

研究区地处 $35^{\circ}58' \text{ N}$, $101^{\circ}53' \text{ E}$;海拔 3 500 m

左右;年均温 $1.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$;年降水量约 620 mm,属高寒湿润区;年日照时数约 2 580 h;年均霜日大于 270 d;主体土壤类型为亚高山草甸土;以莎草科(*Cyperaceae*)嵩草属(*Obresia*)禾本科(*Poaceae*)羊茅属(*Festuca*)早熟禾属(*Poa*)剪股颖属(*Agrostis*)一些种和菊科(*Compositae*)凤毛菊属(*Aussurea*)若干属和毛茛科(*Anunculaceae*)银莲花属(*Nemone*)为优势种并伴以其他杂草的典型高寒草甸的植被类型。主要为多年生草本,仅有少数一年生植物(邱波等,2004)。历史上这里水草丰美,但近年出现了草地退化、生产力降低、毒杂草比例增加、鼠害严重等现象,土地裸露和沙化也有出现。实验地点草场地势平坦,坡度约 3° ,于 2002 年 5 月用围栏包围,之后采取冬春放牧夏秋禁牧的利用方式。

1.2 实验设计

施肥选用 N 和 P 混施。于 2002~2012 年每年的 5 月份,在生长季节初均进行相同施肥处理,选在多云的阴天(多云的阴天施肥,当天或次日有降雨,保证了所施肥在短期内溶于土壤),用手将磷酸氢二铵均匀的洒在小样区。施肥量为 0、30(T_{30})、60(T_{60})、90(T_{90})、120(T_{120}) $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 共 5 个水平,每个水平重复 5 次。共有 25 个区,每个区面积为 60 m^2 ($10 \text{ m} \times 6 \text{ m}$),各区间有 1 m 的缓冲带,缓冲带不施肥,各区的四角用木桩标记。

1.3 样品采集及测定方法

在 2012 年 5、7 和 9 月(生长季的早、中、晚期)中旬,在如上所述的每个小区内随机选择 5 个采样点,在每个采样区内,用“S”形多点取样,除去地表凋落物后,用内径 3.8 cm 的土钻采样,深度为 0~15 cm,将每个采样区内的土样(5 钻)组成一个混合样,混匀后装于密封袋,共取得 25 袋土样立即带回实验室,并测定土壤理化性质和酶活性。

每份混合土样测完水分含量后分为两部分:一部分过 2 mm 筛后用于速效氮分析($4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 保存)。另一部分风干,其中一部分子样品过 2 mm 筛,用于土壤 pH 值,速效磷及脲酶活性的测定;另一子样品过 0.15 mm 筛,用于测定土壤有机碳、全氮和全磷。

土壤有机碳测定采用重铬酸钾法(用定量的重

铬酸钾-浓硫酸溶液)在电砂浴加热,剩余的重铬酸钾用硫酸亚铁标准溶液滴定,并以二氧化硅为添加物作试剂空白标定,根据氧化前后氧化剂质量差值,算出有机碳量。土壤全氮和全磷测定采用半微量开氏法,最后用 SKALAR 型号流动注射分析仪测定。含水量(%)和 pH 值分别用烘干法、酸度计法测定(水土比为 2.5:1)。速效磷用 HCl-NH₄F 法浸提-钼锑抗比色法。速效氮用 2 mol/L 的 KCl 溶液浸提-流动注射分析仪测定。土壤脲酶活性采用靛酚蓝比色法测定(中国土壤学会农业化学专业委员会,1983),其活性以培养 24 h 后每克风干土壤中 NH₃-N 的微克数来表示($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24 \text{ h}^{-1}$)。

1.4 数据分析

数据统计分析均采用 SPSS 17.0 软件。用单因子方差分析(ANOVA)和最小显著差数法(LSD)分析不同施肥处理和季节变化下各土壤理化指标和酶活性的差异显著性检验。用 Pearson's 相关分析法分析土壤酶活性与土壤理化指标间的相关性。

2 结果与分析

2.1 施肥处理和季节变化对土壤含水量、pH 和有机碳的影响

表 1 显示,9 月份土壤含水量顺序为 $T_{120} > T_{60}$

$> T_{90} > T_{30} > T_0$,其中 T_{120} 、 T_{60} 和 T_{90} 与 T_0 之间差异显著;而不同施肥处理对 5 月和 7 月份土壤含水量影响均不显著($P > 0.05$)。季节变化对 T_{30} 、 T_{60} 和 T_{120} 样地的土壤含水量影响显著($P < 0.05$),所有处理下土壤含水量均在 9 月份最小。7 月和 9 月份 pH 总体趋势表现为随施肥量的增大而减少,当施肥量为 T_{120} 时,pH 最小。季节变化只对 T_0 和 T_{120} 两个样地的土壤 pH 影响显著($P < 0.05$)。在 9 月份施肥量为 T_{60} 和 T_{120} 的样地土壤有机碳显著高于对照地 T_0 样地。5 月和 7 月份土壤有机碳随施肥量增加总体呈现单峰曲线变化,5 月份土壤有机碳含量在 T_{60} 梯度最高;7 月份为 T_{30} 梯度最高,但差异均不显著($P > 0.05$)。季节变化对 5 个处理的土壤有机碳含量影响均不显著($P > 0.05$)。

2.2 施肥处理和季节变化对土壤全氮和全磷的影响

由表 2 可知,9 月份施肥量为 T_{60} 样地的土壤全氮含量显著高于对照地 T_0 样地,9 月份土壤全氮随施肥量增加呈单峰曲线变化。5 月和 7 月份土壤全氮随施肥量增加总体也呈单峰曲线变化,在 T_{120} 处略有上升,但差异都不显著($P > 0.05$)。季节变化对 T_{30} 、 T_{60} 两个梯度的土壤全氮含量影响显著($P < 0.05$),5 个梯度样地的土壤全氮含量都在 9 月份达到最高值。

在 5、7 和 9 月三个月,土壤全磷含量对施肥处

表 1 不同施肥处理和季节变化对土壤含水量、pH 和有机碳的影响

Table 1 Effect of fertilization and season on soil moisture, pH and organic carbon

土壤理化性质 Soil properties	采样月份 Sampling time	T_0	T_{30}	T_{60}	T_{90}	T_{120}
含水量(%) Soil moisture	5 月 May	35.08(0.04)aA	36.60(0.01)aA	35.14(0.01)aAB	36.38(0.02)aA	36.96(0.01)aA
	7 月 July	36.03(0.01)aA	36.96(0.01)aA	36.74(0.01)aA	35.75(0.01)aA	36.80(0.01)aA
	9 月 Sep	28.50(0.01)bA	30.93(0.01)abB	33.39(0.01)aB	33.32(0.02)aA	33.98(0.01)aB
pH	5 月 May	6.96(0.12)aB	6.80(0.21)aA	6.68(0.20)aA	6.68(0.21)aA	6.93(0.03)aA
	7 月 July	6.79(0.03)aB	6.72(0.05)aA	6.53(0.12)abA	6.61(0.09)abA	6.36(0.2)bB
	9 月 Sep	7.23(0.02)aA	7.08(0.07)aA	6.68(0.16)bA	6.53(0.21)bA	6.32(0.12)bB
有机碳($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) Soil organic carbon	5 月 May	42.83(1.44)aA	43.33(0.88)aA	45.52(1.88)aA	42.56(0.71)aA	40.74(1.21)aA
	7 月 July	40.78(2.69)aA	43.33(0.91)aA	42.62(1.10)aA	42.04(0.88)aA	42.52(1.43)aA
	9 月 Sep	39.16(1.41)bA	40.70(0.76)abA	45.65(1.29)aA	41.31(2.70)abA	45.11(1.51)aA

注:数据为均值±(标准误),同行不同小写字母表示同一土壤理化指标在不同施肥梯度间差异显著($P < 0.05$)。同列不同大写字母表示同一土壤理化指标在不同月份间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Values are means±SE. Different lowercase letters within the same row indicate significant differences at 0.05 level among different fertilization gradients. Different capital letters within the same line indicate significant differences at 0.05 level among different seasonal changes. The same below.

理的响应都达到显著水平($P < 0.05$),随施肥量的增加土壤全磷含量也表现为逐渐增加的趋势,其顺序依次为 $T_{120} > T_{90} > T_{60} > T_{30} > T_0$ 。季节变化对 T_{60} 、 T_{120} 两个处理的土壤全磷含量影响显著($P < 0.05$),5 个处理的土壤全磷含量随季节的变化都变

现为增长的趋势(T_{30} 除外),即 9 月 $>$ 7 月 $>$ 5 月,与全氮的季节动态变化规律相似。

2.3 施肥处理和季节变化对土壤速效氮和速效磷的影响

随施肥量的增加土壤速效氮含量总体也表现为

增加的趋势。季节变化对5个处理的土壤速效氮含量影响均显著($P < 0.05$),5个梯度的土壤速效氮含量均在7月份最高,9月份最低(T_{60} 除外)。5、7和9三个月土壤速效磷含量对施肥处理的响应与速效

氮相似,也随着施肥量的增加而增加,且差异均达到显著水平($P < 0.05$)。 T_{30} 、 T_{60} 、 T_{90} 和 T_{120} ,4个施肥梯度的土壤速效磷含量随季节变化相似,顺序都为9月>7月>5月,与全磷的季节变化相同。

表2 不同施肥梯度和季节变化对土壤全氮和全磷的影响

Table 2 Effect of fertilization and season on soil total nitrogen and total phosphorus

土壤理化性质 Soil properties	采样月份 Sampling time	T_0	T_{30}	T_{60}	T_{90}	T_{120}
全氮 ($g \cdot kg^{-1}$) Total nitrogen	5月 May	4.31(0.39)aA	4.32(0.15)aB	4.35(0.15)aB	4.11(0.25)aA	4.18(0.17)aA
	7月 July	4.29(0.27)aA	4.50(0.12)aAB	4.55(0.16)aB	4.12(0.06)aA	4.35(0.18)aA
	9月 Sep	4.59(0.28)bA	4.84(0.13)abA	5.32(0.23)aA	4.79(0.28)abA	4.66(0.25)abA
全磷 ($g \cdot kg^{-1}$) Total phosphorus	5月 May	0.85(0.05)cA	1.15(0.06)bA	1.32(0.05)bB	1.60(0.10)aA	1.67(0.08)aB
	7月 July	0.88(0.03)dA	1.32(0.07)cA	1.51(0.06)bAB	1.63(0.03)bA	1.96(0.07)aAB
	9月 Sep	0.96(0.05)dA	1.31(0.03)cA	1.68(0.08)bA	1.81(0.12)abA	2.07(0.16)aA

表3 不同施肥梯度和季节变化对土壤速效氮和速效磷的影响

Table 3 Effect of fertilization and season on soil available nitrogen and available phosphorus

土壤理化性质 Soil properties	采样月份 Sampling time	T_0	T_{30}	T_{60}	T_{90}	T_{120}
速效氮 ($mg \cdot kg^{-1}$) Available nitrogen	5月 May	19.23(1.51)cB	24.68(2.46)bcB	24.54(2.67)bcB	32.35(7.56)bbB	53.65(3.20)aA
	7月 July	36.02(2.28)cA	43.96(1.93)bA	51.65(1.91)aA	54.76(1.75)aA	56.71(2.25)aA
	9月 Sep	16.70(2.36)bB	19.39(0.55)bB	25.10(2.58)abB	31.68(4.17)aB	29.97(3.29)aB
速效磷 ($mg \cdot kg^{-1}$) Available phosphorus	5月 May	5.4(1.51)eA	94.0(4.30)dB	213.0(31.05)cA	289.0(30.72)bbB	430.0(20.92)aB
	7月 July	5.38(1.11)eA	126.0(32.3)dAB	266.0(23.31)cA	398.0(31.3)bbAB	553.0(49.66)aA
	9月 Sep	4.53(0.45)eA	168.0(16.93)dA	307.0(41.20)cA	451.0(45.40)ba	586.0(33.74)aA

表4 不同施肥梯度和季节变化对土壤脲酶活性的影响

Table 4 Effect of fertilization and season on urease activities

土壤理化性质 Soil properties	采样月份 Sampling time	T_0	T_{30}	T_{60}	T_{90}	T_{120}
脲酶 Urease ($\mu g \cdot g^{-1} \cdot 24h^{-1}$)	5月 May	14.40(0.43)abB	22.08(2.40)aA	21.24(2.15)aA	20.22(3.50)abA	12.60(3.77)ba
	7月 July	15.57(0.09)aA	21.06(3.27)aA	19.38(2.82)aA	18.06(2.73)aA	16.68(3.61)aA
	9月 Sep	11.52(0.26)bc	21.30(1.58)aA	18.78(2.67)aA	19.44(3.22)aA	15.66(3.0)abA

表5 土壤酶活性与土壤理化性质之间的相关分析

Table 5 correlation analysis of soil enzyme activity with soil physical-chemical characteristics

项目 Items	土壤含水量 Soil moisture	pH	有机碳含量 Soil organic carbon	全氮含量 Total nitrogen	全磷含量 Total phosphorus	速效氮含量 Available nitrogen	速效磷含量 Available phosphorus
脲酶 Urease	0.134	0.332 * *	-0.075	0.205 *	0.106	-0.096	-0.063

注: * * $P < 0.01$, * $P < 0.05$. Note: * * and * indicate significant relationship at 0.01 and 0.05 level, respectively.

2.4 施肥处理和季节变化对土壤酶活性的影响

由表4可知,随施肥量的增加,3个月份土壤脲酶活性基本均呈现单峰曲线变化。在 T_0 到 T_{30} 施肥梯度间,土壤脲酶活性随施肥量增加而增加;在 T_{30} 到 T_{120} 施肥梯度间,随施肥量增加而降低,即施肥量为 $30 g \cdot m^{-2}$ 时土壤脲酶活性最高。而季节变化只对 T_0 样地的土壤脲酶活性影响显著($P < 0.05$)。

2.5 土壤酶活性与土壤理化性质之间的相关关系

表5结果显示,施肥处理下土壤脲酶活性与全氮含量呈显著正相关($P < 0.05$),与pH呈极显著正

相关($P < 0.01$),而与其他土壤理化指标相关性均不显著。

3 讨论与结论

3.1 施肥处理和季节变化对土壤含水量、pH和有机碳的影响

因为高寒草甸N,P均是限制因子(杜国祯等,1995),所以施肥选用N和P混施(磷酸氢二铵)。而植物群落通常是N限制的,大多研究采用单施N

肥或 P 肥(郑海霞等,2008;魏金明等,2011),较少研究采用 N 和 P 混施(Verma *et al.*,2007)。

土壤含水量不仅与蒸发蒸腾相互制约,而且受降水、太阳辐射等因素制约。9 月份随着高寒草甸施肥量的增加,土壤含水量逐渐增加。由于本研究不同施肥处理样地之间相距不远,地形坡度基本一致,所以降水均等,但由于植被覆盖度在不同施肥处理样地上的差异,太阳对土壤的辐射不同,土壤水分蒸发也就不同,这是导致土壤含水量差异的主要原因,与周华坤等(2005)的研究结果基本一致。

本研究施肥处理对 7 月和 9 月份土壤 pH 均产生显著影响($P < 0.05$)。与对照组 T_0 相比,随着施肥量增加,土壤 pH 明显趋于降低,7 月份土壤 pH 从 6.79 降到 6.36;9 月份 pH 从 7.23 降到 6.32。这与郑海霞等(2008)的研究结果相似。氮、磷化肥特别是氮肥的长期大量施用通常可引起农田土壤的酸化,进而降低土壤质量、威胁作物的可持续生产(魏金明等,2011)。本研究表明氮、磷肥对土壤的酸化作用同样存在于草地生态系统中。

土壤有机质的多寡不仅影响土壤的供肥性能,而且间接影响和改变土壤的物理性状(张成霞等,2010)。有机质是草地土壤质量演变的主要标志(高英志等,2004)和土壤结构的关键影响因子(Cihacek *et al.*,1994)。本研究表明,施肥处理对 5 月和 7 月份土壤有机碳含量均未产生显著影响($P > 0.05$)。施肥可通过提高作物产量及其归还量来增加土壤有机碳含量(Verma *et al.*,2007),化肥的施用对土壤有机碳无显著影响,甚至会产生降低效应(Russell *et al.*,2005)。土壤有机碳含量取决于碳的输入和输出,施肥通常能提高牧草产量(高中超等,2007),进而增加土壤有机碳的输入。本研究在 5 月和 7 月土壤有机碳含量对施肥处理均无显著响应,可能是氮肥、磷肥添加虽然显著提高了草地的地上生物量($P < 0.05$),增加了土壤中碳的输入,但同时也刺激了土壤微生物活性(魏金明等,2011),进而增加了土壤有机碳的输出,碳输入和输出的增加量可能相互抵消,因此在统计上未达到显著水平。

土壤有机碳随施肥量增加总体呈现单峰曲线变化,在施肥量为 30 或 60 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 时较高,施肥量增加到 90 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,土壤资源逐渐降低。说明施肥对土壤有机碳的影响并不是简单的线性正相关关系,可能存在一个响应阈值,超过这个阈值范围,施肥的作用就不明显了,因此化肥并非施的越多越好,而是在

一定量时为最佳。徐明岗等(1997)的研究也确定了氮肥效应曲线为抛物线,这与本研究的结果一致。

3.2 施肥处理和季节变化对土壤全氮和全磷的影响

施肥处理对高寒草甸 5 月和 7 月份土壤全氮含量均无显著影响($P > 0.05$),郑海霞等(2008)研究发现,在内蒙古草原生态系统,连续 5 年施用氮肥对土壤全氮含量无显著影响,与本文研究结果相似。这可能是由于施氮刺激了土壤微生物的活性(Garcia *et al.*,1994),加快了土壤有机氮的分解使其含量降低;同时,施氮后植物的快速生长消耗了土壤中大量的无机氮,因此土壤全氮含量没有显著增加(魏金明等,2011)。5、7 和 9 月土壤全氮均在 T_{60} 梯度最高,总体趋势呈现单峰曲线变化,这和有机碳的变化规律相似。三个月份土壤全磷含量均随施肥量的增大而增加,土壤全磷含量对施肥处理的响应均达显著水平($P < 0.05$)。与李楠等(2001)施磷肥的试验小区的研究结果相似。

本研究中,全氮和全磷含量一般都在 9 月份较高,这可能因为 9 月份是植物生长季的末期,土壤全量养分的消耗主要从植被生长季节初期 5 月份开始到生长季节的旺盛期 7 月份,这段过程土壤全量养分各组分一直需要不断分解转化为速效成分以供应植被快速生长对养分的需求,而到 9 月份植被的凋落季节,此时植物已停止生长并且土壤温度较低,土壤全量养分的分解转化速率变慢,所以全量养分一般是 9 月份含量较高。

3.3 施肥处理和季节变化对土壤速效氮和速效磷的影响

与对照相比,添加氮、磷复合肥对土壤速效氮和速效磷的含量均产生显著影响,并且不同的施肥处理间存在显著差异($P < 0.05$)。5、7 和 9 月随着施肥量的增加土壤速效氮含量均逐渐增加,这也与 Russell *et al.*(2005)的研究结果类似。魏金明等(2011)的研究发现,施磷肥的试验小区土壤速效磷含量显著高于不施磷肥的小区,与本研究结果相似。

本研究中,土壤速效氮含量一般在 9 月份较低,主要原因可能是土壤速效氮的消耗主要在 5~9 月,而 9 月至翌年 4 月为积累期。速效磷表现为 5 月份较低,可能是因为 5 月份的土样是在施肥之前采集的,化肥的效力还没有发挥出来。

3.4 施肥处理和季节变化对土壤酶活性的影响

土壤酶活性与土壤生物、土壤理化性质和环境条件密切相关,可作为衡量土壤肥力的指标(Dick

et al., 1996)。肥料可通过改善土壤水热状况、土壤质地、微生物活性以及植物根系而影响土壤酶活性(李会娜等, 2009)。Vepsilinen *et al.* (2001) 认为化学肥料可通过改善土壤理化性质和微生物区系来影响土壤酶活性, 改善土壤。由于受到土壤类型、植被、气候(气温、降水等)和地形等综合因素影响, 不同区域土壤酶活性对施肥的响应可能存在差异(徐国伟等, 2009)。本研究中, 随施肥量的增加, 三月份土壤脲酶活性均呈现单峰曲线变化。在 T_0 到 T_{30} 的施肥梯度间, 土壤脲酶活性随施肥梯度提高而增加; 在 T_{30} 到 T_{120} 的施肥梯度间, 随施肥梯度提高而降低, 即施肥量为 $30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 时土壤脲酶活性最高。这表明适量施肥对酶活性的提高最为有利, 而过量施用并不一定能取得较为理想的激活效果。

土壤脲酶可直接参与土壤含氮有机化合物的转化(Su *et al.*, 2005), 其活性对提高土壤氮素的利用率和促进土壤氮素循环均有重要意义。本研究结果表明, 土壤脲酶与土壤全氮含量呈显著相关, 表明其活性可以反映氮素的转化过程, 可作为衡量土壤肥力的重要指标。

参考文献:

Cihacek LJ, Swan JB. 1994. Effects of erosion on soil chemical properties in the north central region of the United States[J]. *J Soil Water Conser*, **40**(3):259-265

Dick RP, Breakwell DP, Turco RF, *et al.* 1996. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators[J]. *Methods Assess Soil Qual*, 247-271

Du GZ(杜国祯), Wang G(王刚). 1995. Succession and changes of grassland quality of the artificial grassland communities in subalpine meadow in Gannan(甘南亚高山草甸人工草地的演替)[J]. *Chin Bull Bot*(植物学报), **37**(4):306-313

Foster BL, Gross KL. 1998. Species richness in a successional grassland: effects of nitrogen enrichment and plant litter[J]. *Ecology*, **79**(8):2593-2602

Gao YZ(高英志), Han XG(韩兴国), Wang SP(汪诗平). 2004. The effects of grazing on grassland soils(放牧对草原土壤的影响)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **24**(4):790-797

Gao ZC(高中超), Chi FQ(迟凤琴), Zhao Q(赵秋). 2007. Effects of fertilization on the plant community yield and soil properties of deteriorated grassland(施肥对退化草原植物群落产量及土壤理化性质的影响)[J]. *Grassl Turf*(草原与草坪), **2**:60-62

Garcia FO, Rice CW. 1994. Microbial biomass dynamics in tall-grass prairie[J]. *Soil Sci Soc Am J*, **58**(3):816-823

Li HN(李会娜), Liu WX(刘万学), Dai L(戴莲), *et al.* 2009. Invasive impacts of *Ageratina adenophora* (Asteraceae) on the changes of microbial community structure, enzyme activity and fertility in soil ecosystem(紫茎泽兰入侵对土壤微生物、酶活性及肥力的影响)[J]. *Sci Agric Sin*(中国农业科学), **42**(11):3964-3971

Li N(李楠), Gong CH(龚长虹), Liu W(刘伟), *et al.* 2001. Effect of fertilizer application on the dynamic of nutrition of grassland soil(施肥对草原土壤养分动态变化的影响)[J]. *J Anhui Agric Sci*(安徽农业科学), **29**(1):88-89

Qiu B(邱波), Luo YJ(罗燕江), Du GZ(杜国祯). 2004. The effect of fertilizer gradients on vegetation characteristics in alpine meadow(施肥梯度对甘南高寒草甸植被特征的影响)[J]. *Acta Pratac Sin*(草业学报), **13**(6):65-68

Russell AE, Laird DA, Parkin TB, *et al.* 2005. Impact of nitrogen fertilization and cropping system on carbon sequestration in Midwestern Mollisols[J]. *Soil Sci Soc Am J*, **69**(2):413-422

Su YZ, Li YL, Cui JY, *et al.* 2005. Influences of continuous grazing and livestock exclusion on soil properties in a degraded sandy grassland, Inner Mongolia, northern China[J]. *Catena*, **59**(3):267-278

The professional committee of soil agricultural chemical(中国土壤学会农业化学专业委员会). 1983. The general analysis methods of soil agricultural chemical(土壤农业化学常规分析方法)[M]. Beijing(北京): Science Press(科学出版社), 20-169

Vepsilinen M, Kukkonen S, Vestberg M. 2001. Application of soil enzyme activity test kit in a field experiment[J]. *Soil Biol Biochem*, **33**:1665-1672

Verma S, Sharma PK. 2007. Effect of long-term manuring and fertilizers on carbon pools, soil structure, and sustainability under different cropping systems in wet-temperate zone of northwest Himalayas[J]. *Biol Ferti Soil*, **44**(1):235-240

Wang CT(王长庭), Long RJ(龙瑞军), Wang QL(王启兰), *et al.* 2008. Response of plant diversity and productivity to soil resources changing under grazing disturbance on an alpine meadow(放牧扰动下高寒草甸植物多样性、生产力对土壤养分条件变化的响应)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **29**(8):4144-4152

Wang CT, Long RJ, Wang QL, *et al.* 2010. Fertilization and litter effects on the functional group biomass, species diversity of plants, microbial biomass and enzyme activity of two alpine meadow communities[J]. *Plant Soil*, **331**(1/2):377-389

Wang CT(王长庭), Wang GX(王根绪), Liu W(刘伟), *et al.* 2013. Effects of fertilization gradients on plant community structure and soil characteristics in alpine meadow(施肥梯度对高寒草甸群落结构、功能和土壤质量的影响)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **33**(10):3103-3113

Wang CT(王长庭), Wang QL(王启兰), Jing ZC(景增春), *et al.* 2008. Vegetation roots and soil physical and chemical characteristic changes in *kobresia pygmaca* meadow under different grazing gradients(不同放牧梯度下高寒小嵩草草甸植被根系和土壤理化特征的变化)[J]. *Acta Pratac Sin*(草业学报), **17**(5):9-15

Wang QL(王启兰), Wang X(王溪), Cao GM(曹广民), *et al.* 2011. Soil quality assessment of alpine meadow in Haibei State of Qinghai Province(青海省海北州典型高寒草甸土壤质量评价)[J]. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **22**(6):1416-1422

Wei JM(魏金明), Jiang Y(姜勇), Fu MM(符明明), *et al.* 2011. Effects of water addition and fertilization on soil nutrient contents and pH value of typical grassland in Inner Mongolia(水、肥添加对内蒙古典型草原土壤碳、氮、磷及 pH 的影响)[J]. *Chin J Ecol*(生态学杂志), **30**(8):1642-1646

(下转第 449 页 Continue on page 449)