

DOI: 10.5846/stxb202102170450

张玉林, 陆永兴, 尹本丰, 李永刚, 周晓兵, 张元明. 模拟降雨变化对古尔班通古特沙漠土壤养分及酶活性的影响. 生态学报, 2022, 42(5): 1739-1749.

Zhang Y L, Lu Y X, Yin B F, Li Y G, Zhou X B, Zhang Y M. Effects of simulated rainfall on soil nutrient contents and enzyme activities in the Gurbantunggut Desert, China. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(5): 1739-1749.

模拟降雨变化对古尔班通古特沙漠土壤养分及酶活性的影响

张玉林^{1,2}, 陆永兴^{1,2}, 尹本丰¹, 李永刚¹, 周晓兵^{1,*}, 张元明¹

1 中国科学院新疆生态与地理研究所, 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 土壤酶参与土壤系统的养分循环过程, 是联系植物和土壤养分的关键纽带。土壤酶活性对降水格局变化响应敏感, 这种响应对于缺水且养分贫瘠的荒漠生态系统显得尤为重要。然而, 早春积雪完全融化后首次降雨时间及降雨量如何影响土壤养分及土壤酶活性还鲜见相关报道。以新疆古尔班通古特沙漠为研究区, 在早春积雪完全融化后, 设置 3 个首次降雨时间(积雪完全融化后第 10 天、20 天和 30 天)和 3 个降雨梯度(5 mm、10 mm 和 15 mm), 于植物生长旺季采集土壤样品, 研究土壤养分含量和土壤酶活性的响应特征。结果表明: 积雪完全融化后不同首次降雨时间下 5 mm 降雨处理以及积雪完全融化后第 30 天下各降雨量处理对土壤养分和酶活性影响不显著。积雪完全融化后第 10 天, 随降雨量增加, 土壤全氮呈显著先下降后增加趋势, 全钾呈显著增加趋势, 而土壤微生物量碳呈显著降低趋势; 积雪完全融化后第 20 天, 随降雨量增加, 速效氮、土壤蔗糖酶活性、土壤微生物量碳氮呈先下降后增加趋势, 土壤全碳和多酚氧化酶活性显著下降, 土壤全钾和碱性磷酸酶活性显著增加。模拟 10 mm 降雨, 随首次降雨时间推迟, 土壤全氮、速效氮、速效磷、土壤蔗糖酶活性和土壤微生物量碳呈增加趋势; 模拟 15 mm 降雨, 随首次降雨时间推迟, 土壤全磷、土壤蔗糖酶、碱性磷酸酶活性和土壤微生物量碳氮呈先增加后下降趋势, 而土壤多酚氧化酶和过氧化物酶活性显著增加。积雪完全融化后第 10 天和 20 天后, 15 mm 降雨处理下对土壤大部分指标促进效应最大。研究表明, 早春积雪完全融化后, 推迟首次降雨时间, 添加大降雨量(15 mm)显著提高土壤微生物活性及不同养分之间的转化, 能够补偿一段时间的干旱对养分转化的抑制效应, 从而提高早春短命植物生长期土壤养分供给能力。

关键词: 古尔班通古特沙漠; 首次降雨时间; 首次降雨量; 土壤酶活性; 土壤养分

Effects of simulated rainfall on soil nutrient contents and enzyme activities in the Gurbantunggut Desert, China

ZHANG Yulin^{1,2}, LU Yongxing^{1,2}, YIN Benfeng¹, LI Yonggang¹, ZHOU Xiaobing^{1,*}, ZHANG Yuanming¹

1 State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Soil enzymes actively participate in the nutrient transformation of soil system and are the key link between plants and soil nutrients. Soil enzyme activity is sensitive to the changes in rainfall patterns, particularly in deserts where rainfall is generally low and highly spatially and temporally variable. Little is known about how the timing and amount of rainfall affect soil nutrient contents and soil enzyme activity in areas where soil moisture is driven by snowmelt, particularly in early spring following complete snowmelt. We examined soil nutrient contents and enzyme activity at three times (Days 10, 20 and 30)

基金项目: 自治区创新环境(人才、基地)建设专项(2018Q009); 国家自然科学基金(41977099, U2003214); 中国科学院青年促进会(Y201976)

收稿日期: 2021-02-17; **网络出版日期:** 2021-11-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhoubx@ms.xjb.ac.cn

and three rainfall amounts (5 mm, 10 mm, 15 mm) after complete snow melt, the period of maximum plant growth in the Gurbantunggut Desert in western China. We found no response under the lowest rainfall treatment (5 mm) at any times. The addition of 10 mm of rainfall stimulated a positive response in soil nutrients (e.g., nitrogen, phosphorus) but the 15 mm addition of rainfall had the greatest promotion effect on most soil indices such oxidase, phosphatase, and peroxidase activity, particularly 10 and 20 days after complete snow melt. Our results show that delaying of first rainfall time and addition of 15 mm rainfall after snowmelt can significantly increase soil microbial activity and nutrient transformation. These treatments can compensate for the inhibition effect of drought on nutrient transformation for a certain time period and enhance soil nutrients supply capacity in the growth period of desert ephemeral plants in early spring.

Key Words: Gurbantunggut desert; first rainfall time; first rainfall amount; soil enzyme activities; soil nutrient

随着全球气候的变暖,极端降雨事件已引起人们的广泛关注^[1-2]。其中,降雨格局的变化主要体现在降雨总量和分布的变化,如单次降雨量偏多及降雨间隔时间延长,春季降雨时间延迟等事件将会增加^[3]。降雨格局的变化能够改变植物群落的物种组成^[4-5],影响土壤酸碱度、养分以及与之相关的酶活性等^[6-7]。土壤酶在土壤生态过程中发挥重要作用,土壤中的各种生化反应几乎都是在酶的催化作用下进行^[8]。同时,土壤酶也是土壤中最活跃的部分,参与碳(C)、氮(N)、磷(P)等元素的循环,影响土壤养分转化^[9-10]。

研究表明,土壤含水量过高或过低都会抑制土壤酶活性^[11-12]。不同土壤酶对降雨改变的响应也不相同,降雨间隔时间的缩短和降雨量的增加可显著提高荒漠土壤酶活性,且土壤水解酶的活性显著高于其他胞外酶活性^[13]。研究模拟降雨对荒漠土壤酶的影响发现,降雨显著地改变了土壤酶活性,除土壤淀粉酶和过氧化氢酶活性受水分影响不显著外,其他土壤酶活性均随着水分的增加而逐渐升高^[14]。对毛苔草(*Carex lasiocarpa*)湿地研究发现,土壤水分增加显著降低蔗糖酶和脲酶活性,并提高过氧化氢酶活性^[15]。Henry 等人^[16]在草地生态系统的土壤酶研究中发现,与未增加降水相比,增加降水使水解酶活性下降,而多酚氧化酶和过氧化物酶的活性增大。不同土层也可能影响土壤酶活性对降雨变化的响应^[17-18]。例如,李帅军等^[18]人通过隔离降雨对格氏栲自然保护区米楮天然林土壤酶研究发现,隔离降雨处理(遮雨 30% 和 60%)均增加 0—10 cm 土壤的多酚氧化酶和过氧化物酶活性,却降低了 10—20 cm 土壤的多酚氧化酶和酸性磷酸酶活性。除土壤酶活性外,土壤微生物量是指示土壤微生物活体总量和养分状态的重要指标,一般包括土壤微生物量碳和氮。土壤微生物在土壤养分中发挥缓冲器作用,是土壤可利用养分潜力的重要指标。土壤微生物量对降雨间隔时间和降雨量响应不同。研究表明,增加降雨量使土壤微生物量碳氮产生激发效应,而随着降雨间隔时间延长,土壤微生物量逐渐下降^[19]。尽管近些年开展了大量有关土壤酶活性和微生物量的研究,但鲜见荒漠地区降雨时间和降雨量变化影响下的相关研究报道,尤其是早春积雪完全融化后的首次降雨变化。

综上所述,在荒漠,稀少、多变的降雨量对土壤养分及酶活性影响较大。由于荒漠区域土壤养分贫瘠,积雪完全融化后,随着首次降雨时间的推迟,土壤会经历干旱化加剧的过程,可能导致早春土壤养分特性和酶活性发生较大变化。古尔班通古特沙漠属于典型的温带荒漠,冬季完全被积雪所覆盖,厚度约 20—30 cm,稳定积雪日数一般在 100—150 d,冬春两季降水量一般约占全年降水量的 30%—45%^[20-21]。该沙漠春季草本植物大量生长,可占据群落生产力的 52% 左右^[22],需要充足的养分供给,而冬季稳定积雪融化带来的水分以及积雪融化后的降水可促进荒漠地区土壤酶活性和养分循环^[23-24]。因此,积雪融水和随后的不同降水格局变化可能产生协同效应,共同影响了土壤养分转化。本研究通过在古尔班通古特沙漠设定样方,模拟早春首次降雨时间及降雨量,探究早春积雪完全融化后首次降雨变化对土壤养分、土壤酶活性和土壤微生物量的影响。研究结果将有助于评估早春首次降雨时间推迟后,荒漠生态系统早春土壤养分动态变化,并为探明首次降雨格局变化对荒漠草本植物生长发育的影响机制提供数据支撑。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区域位于新疆古尔班通古特沙漠,是我国最大的固定和半固定沙漠,属于温带大陆性气候。该区域年平均气温为 7.3 ℃,年潜在蒸发量达 2606.6 mm 左右^[25]。研究区域的自然植被以梭梭(*Haloxylon ammodendron*)和白梭梭(*H. persicum*)为优势建群种;低矮半灌木以蛇麻黄(*Ephedra distachya*)为主,草本植物中尖喙牻牛儿苗(*Erodium oxyrhinchum*)、条叶庭荠(*Alyssum linifolium*)、琉苞菊(*Centaurea pulchella*)、角果藜(*Ceratocarpus arenarius*)、刺沙蓬(*Salsola ruthenica*)等占优势。此外,研究区域地表还广泛分布有生物土壤结皮。

1.2 实验设计

实验样地设在古尔班通古特沙漠东南部(44.61° N, 88.26° E),选择地势平坦、植被生长一致区域作为实验场地,采用随机区组设计,包括积雪完全融化后首次降雨时间和降雨量 2 个处理,每个处理分别设置 3 个水平;其中首次降雨时间的 3 个梯度为:积雪完全融化后第 10 天、20 天和 30 天,降雨量的 3 个梯度为:5 mm、10 mm 和 15 mm。降雨量梯度参考多年降雨量大小以及可能出现的极端降雨事件进行综合确定^[26—28],根据 2009—2019 a 古尔班通古特沙漠气象数据,该区域年降水量 70—150 mm,3 月份最大降雨量可达 15.5 mm,最小降雨量均在 5 mm 左右^[26];根据监测,积雪融化后首次降雨到来时间基本位于 10 d 至 30 d 之间,以 20 d 左右居多。实验区域,土壤基本理化性质见表 1。本实验共 9 个处理,每个处理 5 个重复,样方大小为 1.5 m×1.5 m,样方间留有 1 m 的缓冲隔离区。为防止自然降雨干扰,采用不锈钢钢管架搭建遮雨装置,其面积为 2 m×2 m,高度 30 cm^[29],将 PVC 板(透光性大于 95%)平铺固定在钢管架上,并使其水平面与地面平行。该遮雨装置可将整个实验样方遮挡,边缘保留 0.25 m 的缓冲区,其高度也尽可能消除了遮阳板带来的增温效应。2020 年 3 月 21 日(积雪完全融化后 10 d)开始进行模拟降雨处理。模拟降雨时临时打开遮雨装置,用静置 3 d 的自来水作为模拟降雨水源,通过喷雾器将水均匀喷洒于处理样方。模拟降雨在傍晚开展,以尽量减小蒸发作用的影响,同时避免发生地表径流。

短命植物是古尔班通古特沙漠最重要的草本植物层片,对于荒漠生态系统的沙面稳定具有至关重要的作用^[30]。短命植物在土壤水分充足的早春季节快速生长,在夏季干旱到来之前完成生活史,因此受早春降雨格局和养分供给影响较大。本研究选择在短命植物生长旺季(5 月 4 日),进行土壤样品的采集与处理,分析土壤酶活性和养分供给状况。利用土钻(直径为 5 cm)在每个处理样方按照三点取样法收集 0—5 cm 土样。每个处理采集的土样混匀后,装密封袋,带回实验室,将样品分为 2 份,一份置于遮光处自然风干,用于测定土壤全碳、全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷、速效钾和 pH 值;另一份置于 4 ℃ 冰箱用于土壤酶活性和土壤微生物量碳氮的测定。

表 1 实验区土壤基本理化性质

Table 1 Soil basic physicochemical characteristics in the study site

土层 Soil depth	pH	全碳 TC/(g/kg)	全氮 TN/(g/kg)	全磷 TP/(g/kg)	全钾 TK(g/kg)	速效氮 AN/(mg/kg)	速效磷 AP/(mg/kg)	速效钾 AK/(mg/kg)
0—5 cm	8.81±0.04	2.55±0.08	0.17±0.01	0.85±0.02	20.11±0.12	26.20±1.17	4.46±0.39	151.5±8.97

TC, 全碳 total carbon; TN, 全氮 total nitrogen; TP, 全磷 total phosphorus; TK, 全钾 total potassium; AN, 速效氮 available nitrogen; AP, 速效磷 available phosphorus; AK, 速效钾 available potassium

1.3 土壤养分的测定

土壤全氮采用高氯酸-硫酸消化-蒸馏定氮法测定;土壤全磷采用高氯酸-硫酸消化-钼锑抗比色法测定;土壤全钾采用氢氧化钠熔融-火焰光度法测定;速效氮用碱解蒸馏法测定;土壤速效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定;土壤速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定;pH 用 pHHS-3C 精密酸度计测定;土壤微生物量碳氮采用氯仿熏蒸浸提法测定^[31]。

1.4 土壤酶活性的测定

本实验土壤酶活性采用试剂盒方法(苏州格瑞思生物科技有限公司)测定,方法如下:土壤多酚氧化酶与过氧化物酶活性采用乙醚比色法,以 30 ℃ 下培养 1 h,每克土样每小时生成的紫色没食子素量表示酶活性。土壤蔗糖酶活性用 3,5-二硝基水杨酸比色法,以 37 ℃ 下培养 4 h 每克土样每小时生成的葡萄糖数表示蔗糖酶活性。土壤脲酶活性用靛酚蓝比色法测定,37 ℃ 下培养 24 h,用每克土样每小时生成的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的数量表示脲酶活性。土壤碱性磷酸酶活性用磷酸苯二钠比色法测定,37 ℃ 下培养 1 h,用每克土样每小时生成的苯酚数量表示碱性磷酸酶活性。

1.5 数据分析

利用双因素方差(Two-way ANOVA)分析首次降雨时间和降雨量对土壤养分、土壤酶活性及土壤微生物量碳氮的影响;对同一首次降雨时间不同降雨量或同一降雨量不同首次降雨时间处理之间的土壤养分、土壤酶活性及土壤微生物量碳氮指标采用单因素方差进行分析(One-way ANOVA),利用 LSD(Least significant difference)法进行多重比较($P = 0.05$)。统计分析利用 R 3.5.0 software(R Development Core Team 2017)完成,并利用 R 软件“ggplot2 包”完成土壤酶活性和微生物量碳氮的图形绘制,利用“psych 包”和“corrplot 包”进行土壤养分、土壤酶活性及土壤微生物量碳氮皮尔逊(Pearson)相关性分析。

2 结果和分析

2.1 首次降雨时间及降雨量对土壤养分的影响

双因素方差分析表明,首次降雨时间极显著影响土壤全碳和全钾,显著影响速效氮。降雨量对土壤氮磷比影响显著,而土壤全氮、全磷、速效氮和速效磷也接近显著水平。首次降雨时间和降雨量二者交互作用显著影响土壤 pH 和速效氮(表 2)。

表 2 首次降雨时间和降雨量处理对土壤理化特征及酶活性影响的双因素方差分析

土壤理化指标 Soil physical and chemical index	降雨量 R	降雨时间 T	降雨量×降雨时间 R×T
全氮(TN)	2.99	0.21	1.68
全磷(TP)	2.66	0.07	2.56
氮/磷(N/P)	5.02 *	0.13	1.82
全钾(TK)	0.79	14.99 **	0.36
速效氮(AN)	2.82	4.49 *	3.41 *
速效磷(AP)	3.01	0.60	0.57
速效氮磷比(AN/AP)	1.43	4.00 *	1.07
速效钾(AK)	0.33	2.20	0.31
pH 值	0.83	1.81	3.59 *
全碳(TC)	1.18	8.96 **	0.54
土壤多酚氧化酶(S-PPO)	8.04 **	0.35	3.62 *
土壤过氧化物酶(S-POD)	4.73 *	0.24	0.37
土壤蔗糖酶(S-SC)	1.86	1.85	4.79 **
土壤碱性磷酸酶(S-ALP)	4.36 *	0.44	2.24
土壤脲酶(S-UE)	0.75	0.56	0.55
土壤微生物量碳(SMBC)	14.27 **	10.15 **	6.43 **
土壤微生物量氮(SMBN)	0.79	8.66 **	9.87 **
土壤微生物量碳氮比(SMBC/SMBN)	19.75 **	4.63 *	11.95 **

表中数值为 F 检验值; *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$; T: 首次降雨时间 first rainfall time; R: 降雨量 first rainfall amount; R×T: 降雨量与首次降雨时间交互 first rainfall amount×first rainfall time interaction; N/P: 氮/磷 total nitrogen/total phosphorus; AN/AP: 速效氮/速效磷 available nitrogen/available phosphorus; S-PPO: 土壤多酚氧化酶 soil polyphenol oxidase; S-POD: 土壤过氧化物酶 soil peroxidase; S-SC: 土壤蔗糖酶 soil sucrase; S-ALP: 土壤碱性磷酸酶 soil alkaline phosphatase; S-UE: 土壤脲酶 soil urease; SMBC: 土壤微生物量碳 soil microbial biomass carbon; SMBN: 土壤微生物量氮 soil microbial biomass nitrogen; SMBC/SMBN: 土壤微生物量碳/土壤微生物量氮 soil microbial biomass carbon/soil microbial biomass nitrogen

积雪完全融化后第 10 天,随降雨量增加,全碳呈先下降后增加趋势,全钾呈增加趋势;积雪完全融化后第 20 天,随降雨量增加,速效氮呈先下降后增加趋势,全碳呈下降趋势,而土壤全钾呈增加趋势;积雪完全融化后第 30 天,降雨量增加对土壤养分各指标影响不显著(表 3)。模拟 5 mm 降雨在积雪完全融化后首次降雨各时期对土壤各养分影响不显著;模拟 10 mm 降雨,随首次降雨时间延迟,土壤全氮、氮磷比、速效氮和速效磷显著增加;模拟 15 mm 降雨,随首次降雨时间延迟,土壤速效氮磷比、土壤体积含水量呈先增加后下降趋势,而土壤全磷呈先增加后下降趋势。同一首次降雨时间下,除土壤养分外,土壤体积含水量随着降雨量的增加呈增加趋势,然而,降雨量的大小对土壤 pH 影响较小,而积雪完全融化后第 30 天模拟 5 mm 和 10 mm 降雨可降低土壤 pH(表 3)。

2.2 首次降雨时间及降雨量对土壤酶活性的影响

双因素方差分析表明,首次降雨时间对土壤酶活性影响不显著。降雨量对土壤碱性磷酸酶和过氧化物酶活性影响显著,极显著影响土壤多酚氧化酶活性。降雨时间和降雨量二者交互也可显著影响土壤多酚氧化酶活性,极显著影响土壤蔗糖酶活性(表 2)。

积雪完全融化后第 10 天或第 30 天,降雨量增加对土壤各酶活性指标影响不显著;积雪完全融化后第 20 天,随降雨量增加,除土壤过氧化物酶和脲酶活性影响不显著外,土壤多酚氧化酶活性呈下降趋势,土壤蔗糖酶活性呈先下降后增加趋势,而土壤碱性磷酸酶活性呈增加趋势(图 1)。模拟 5 mm 降雨在积雪完全融化后首次降雨各时期对土壤酶活性影响均不显著;模拟 10 mm 降雨,随首次降雨推迟,土壤蔗糖酶活性显著增加,而土壤其他酶活性差异不显著;模拟 15 mm 降雨,除土壤脲酶活性影响不显著外,土壤多酚氧化酶和过氧化物

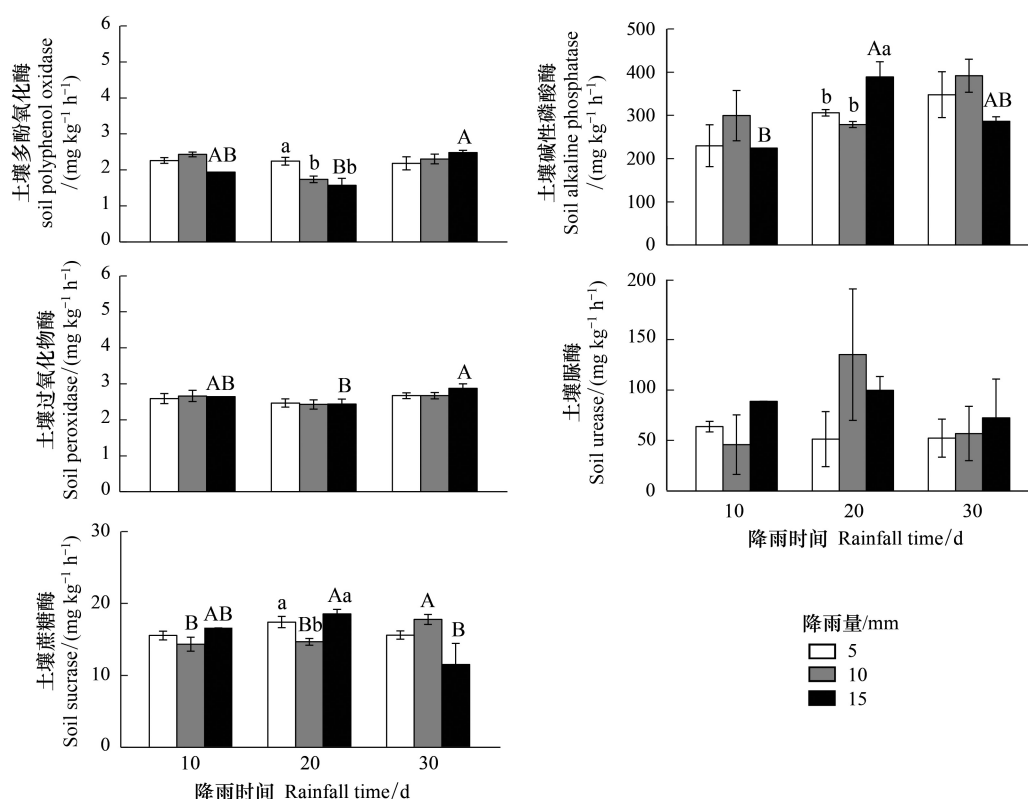


图 1 积雪完全融化后降雨变化对土壤多酚氧化酶、过氧化物酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶和脲酶活性的影响(平均值±标准误)

Fig.1 Effects of rainfall change after snow completely melted on activities of soil polyphenol oxidase, peroxidase, sucrose, alkaline phosphatase and urease (mean ± SE)

10 d、20 d 和 30 d 分别表示积雪完全融化后的第 10 天、20 天和 30 天;不同小写字母(a、b 和 c)表示同一首次降雨时间处理下,不同降雨量处理间差异显著;不同大写字母(A、B 和 C)表示同一降雨量处理下,不同首次降雨时间处理间差异显著($P < 0.05$)

表 3 首次降雨时间和降雨量对土壤理化特征的影响 (平均值±标准误差)

Table 3 Effects of first rainfall time and amounts on soil physicochemical characteristics (mean±SE)												
处理 Treatment	pH	体积含水量 VWC/%	全碳 TC/(g/kg)	全氮 TN/(g/kg)	全磷 TP/(g/kg)	全钾 TK(g/kg)	速效氮 AN/(mg/kg)	速效磷 AP/(mg/kg)	速效钾 AK/(mg/kg)	氮磷比 N/P	速效氮磷比 AN/AP	
10 d	5 mm	5.59±0.28Ab	3.59±0.13a	0.18±0.01	0.87±0.01	18.51±0.18b	38.70±4.98	5.71±0.42	165.63±8.98	0.21±0.02	6.89±1.09	
	10 mm	6.12±0.28Ab	2.53±0.26b	0.17±0.01B	0.85±0.02	17.96±0.29b	24.14±3.27B	4.95±0.21B	167.67±32.05	0.20±0.01B	4.84±0.46	
	15 mm	6.54±0.29Ba	2.93±0.24ab	0.18±0.02	0.84±0.02AB	19.99±0.07a	26.19±4.28	5.22±0.49	181.20±11.79	0.22±0.02	4.96±0.35B	
20 d	5 mm	4.44±0.19Bb	3.87±0.12a	0.19±0.01	0.77±0.02	18.54±0.27b	39.44±0.68a	6.09±0.45	153.50±8.49	0.25±0.01	6.53±0.44	
	10 mm	5.32±0.22Bb	2.92±0.39b	0.18±0.01B	0.86±0.03	18.26±0.25b	27.01±1.22Bb	4.91±0.25B	162.87±8.54	0.21±0.02B	5.55±0.53	
	15 mm	7.39±0.32Aa	2.87±0.17b	0.23±0.03	0.86±0.02A	19.94±0.26a	41.44±5.51a	6.95±1.41	185.87±11.69	0.27±0.03	6.13±0.44A	
30 d	5 mm	4.89±0.22Bb	3.86±0.56	0.21±0.03	0.85±0.04	18.99±0.64	38.29±3.75	7.08±1.72	177.97±19.18	0.25±0.05	5.83±0.87	
	10 mm	5.63±0.29Aa	3.33±0.29	0.23±0.01A	0.76±0.06	18.72±0.70	39.34±3.88A	7.08±0.58A	157.57±9.19	0.31±0.02A	5.57±0.46	
	15 mm	6.47±0.27Ba	2.94±0.04	0.20±0.01	0.78±0.02B	19.88±0.29	29.52±2.46	6.74±0.60	199.40±22.97	0.25±0.01	4.38±0.05B	

10 d、20 d 和 30 d 分别表示积雪完全融化后的第 10 天、20 天和 30 天; VWC, 体积含水量 Volumetric water content; 不同小写字母(a、b 和 c)表示同一首次降雨时间处理下, 不同降雨量处理间差异显著; 不同大写字母(A、B 和 C)表示同一降雨量处理下, 不同首次降雨时间处理间差异显著 ($P < 0.05$)

酶活性仅在积雪完全融化后第 30 天显著大于积雪完全融化后第 10 天或 20 天,而土壤蔗糖酶和碱性磷酸酶活性仅在积雪完全融化后第 20 天显著大于积雪完全融化后第 10 天或 30 天(图 1)。

2.3 首次降雨时间及降雨量对土壤微生物量碳、氮的影响

双因素方差分析表明,首次降雨时间极显著影响土壤微生物量碳氮。降雨量对土壤微生物量碳和土壤微生物量碳氮比影响极显著。降雨时间和降雨量二者交互极显著影响土壤微生物量碳氮及微生物量碳氮比(表 2)。

积雪完全融化后第 10 天,随降雨量增加,土壤微生物量碳呈下降趋势,而土壤微生物量氮和微生物量碳氮比差异不显著;积雪完全融化后第 20 天,随降雨量增加,土壤微生物量碳氮呈先下降后增加趋势,微生物量碳氮比呈先增加后下降趋势;积雪完全融化后第 30 天,土壤微生物量碳氮及微生物量碳氮比在模拟 5 mm 降雨量高于模拟 10 mm 和 15 mm 降雨量,但差异不显著(图 2)。模拟 5 mm 降雨在积雪完全融化后首次降雨各时期对土壤微生物量碳氮及土壤微生物量碳氮比影响不显著;模拟 10 mm 降雨,随首次降雨推迟,土壤微生物量碳呈增加趋势,土壤微生物量碳氮比呈先增加后下降趋势,而土壤微生物量氮差异不显著;模拟 15 mm 降雨,土壤微生物量碳氮在积雪完全融化后第 20 天显著大于积雪完全融化后第 10 天和 30 天,而土壤微生物量碳氮比随积雪完全融化后首次降雨时间的推迟而显著增加(图 2)。

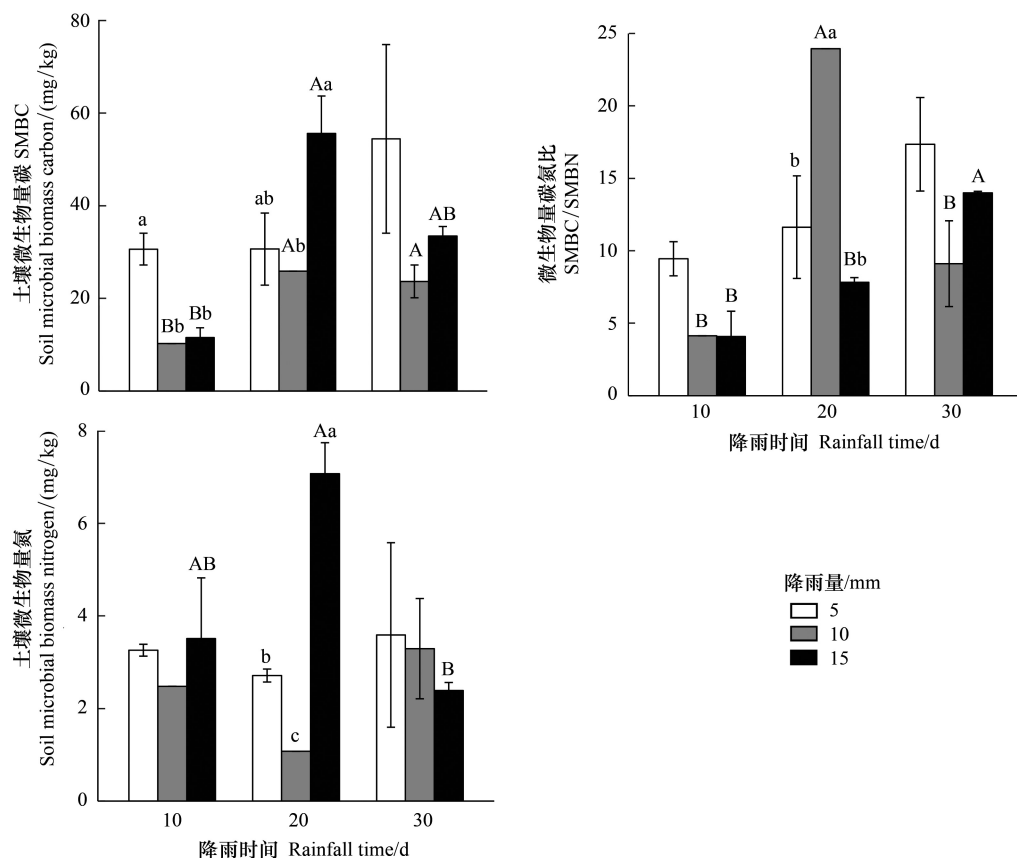


图 2 积雪完全融化后降雨变化对土壤微生物量碳氮的影响(平均值±标准误差)

Fig.2 Effects of rainfall change after snow completely melted on soil microbial biomass carbon and nitrogen (mean±SE)

2.4 土壤养分、土壤微生物量和土壤酶活性的相关性分析

相关性分析表明,土壤多酚氧化酶活性与土壤过氧化物酶活性呈极显著正相关关系,与土壤全磷和脲酶活性呈负相关关系。土壤碱性磷酸酶活性与全氮、速效氮、速效磷、氮磷比呈极显著正相关关系,与土壤蔗糖酶活性呈显著正相关关系。土壤过氧化物酶活性和脲酶活性与土壤理化指标均无显著关系。除土壤蔗糖酶

活性与土壤 pH 负相关外,其他酶活性与土壤 pH 变化不相关(图 3)。

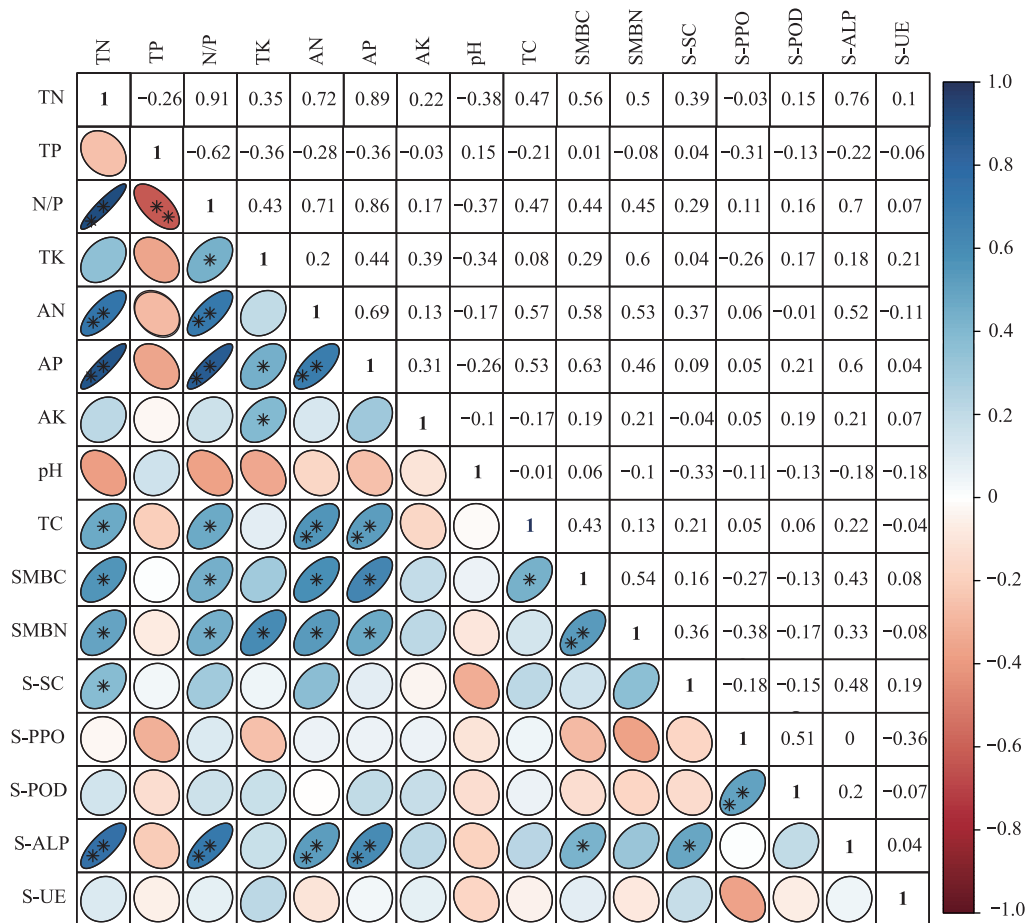


图 3 土壤养分、土壤酶活性和土壤微生物量的相关性分析

Fig.3 Correlation analysis of soil nutrient, enzyme activities and microbial biomass

3 讨论

3.1 土壤养分和土壤微生物量碳氮对首次降雨时间和降雨量变化的响应

水分是荒漠地区主要的限制因子,小降雨事件在一定程度上缓解荒漠土壤水分及养分运输的限制,但由于荒漠蒸发量较大,导致表层土壤含水量在短期内下降,土壤微生物活性受到限制,影响分解和合成土壤有机物质^[32]。本研究发现,中等以上降雨量($\geq 10\text{ mm}$)在不同的降雨时间点造成的效应不同。模拟 10 mm 降雨,首次降雨时间推迟对土壤养分(土壤全氮、速效氮和速效磷)的促进作用越明显。然而,张丽华等人^[33]在沙漠草原西部黄土高原进行了一项为期 3 a 的控制降水实验($\pm 20\%$ 和 $\pm 40\%$)研究发现,降水处理对土壤可溶性有机碳、土壤微生物量碳和土壤养分的影响较小。在沙质土壤的荒漠,很难发生较大径流,水分入渗快且可进入深土层,从而提高微生物活性,加快土壤养分含量转化^[34]。有研究表明,随降雨量增加或减少,磷在土壤中的限制作用将增加^[35]。Bell 等^[36]对北美沙漠季节性降雨研究发现,在 $5\text{—}7\text{ a}$ 降雨处理的样地,土壤有效磷含量低于持续干旱区。而本研究中,模拟 15 mm 降雨,随首次降雨时间推迟,土壤全磷呈先增加后下降趋势;土壤有效磷在相同降雨时间下,随降雨量增加差异不显著。因此,早春季节降雨对磷含量及其转化,以及植物吸收的影响还有待于进一步深入研究。总体来讲,本实验中首次降雨格局变化不仅影响养分的转化,同时还影响植物的生长和物种多样性的变化(数据未发表),造成植物养分吸收差异,使得不同处理下土壤的全量养分和速效养分有差异。

土壤微生物量碳氮在陆地生态系统的养分转化中发挥着关键作用,既是养分的源也是库^[37]。土壤微生物量碳氮受影响因素较多,对环境变化敏感^[38]。植物生长对养分的需求也有可能造成其变化复杂的特点。本研究结果表明,在积雪完全融化后的不同首次降雨时间下,模拟 5 mm 降雨并未对土壤微生物量碳氮有显著的影响,而模拟大于 10 mm 降雨显著影响土壤微生物量碳氮及微生物量碳氮比值。前人研究同样发现,在古尔班通古特沙漠春季模拟降雨处理(5 mm)对土壤微生物量碳氮及土壤微生物量碳氮比值影响不显著^[39]。可能因为春季植物生长活动较为强烈,需要大量的养分,小降雨事件对土壤微生物量碳氮的影响被掩盖,而大降雨有利于微生物分解有机质,增加养分含量,提高土壤微生物量碳氮。

3.2 土壤酶活性对首次降雨时间和降雨量变化的响应及与养分变化关系

在许多系统中,土壤酶活性对水分波动响应强烈,随降雨量的增加而增加^[40]。土壤水分的增加可以刺激微生物产生酶,加快土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)等循环,增加养分供给^[41]。土壤氧化酶(如多酚氧化酶和过氧化物酶)能够调节木质素的分解,参与土壤碳循环过程^[13]。Bell 等^[10]在北美沙漠研究发现,随着干旱程度的增加,土壤有机碳、土壤微生物量氮和土壤酶活性均显著降低。然而,本研究发现,积雪完全融化后第 20 天模拟降雨处理,土壤多酚氧化酶活性随降雨量增加而下降,而土壤过氧化物酶活性差异不显著。土壤酶活性和养分的可利用性随降雨量而变化,大降雨事件不仅触发了土壤微生物的活动,可能通过影响植物和微生物的活动影响了养分的可利用性^[13]。土壤氧化酶活性在水分较多的春季活性较高,而在其他季节活性较低,同样说明水分的限制作用^[23]。本研究中,模拟 15 mm 降雨,土壤多酚氧化酶活性和土壤过氧化物酶活性整体呈现随首次降雨时间延迟而增加的趋势。然而,李帅军等^[16]人通过隔离降雨对格氏栲自然保护区米楮天然林土壤酶活性的研究表明,隔离降雨处理(遮雨 30%和 60%)均增加 0—10 cm 土层土壤多酚氧化酶和过氧化物酶活性。可能降雨时间延迟明显改善了土壤通气状况,在一定程度上抑制土壤形成厌氧环境^[42],增加这两种氧化酶的产量,使土壤多酚氧化酶和过氧化物酶活性增加,促进土壤凋落物的分解和有机质的合成过程,加速碳氮循环过程及土壤养分的富集^[39,43]。

除氧化酶外,水解酶(包括蔗糖酶、脲酶、磷酸酶等)活性也是表征土壤不同养分的重要指标^[44]。土壤蔗糖酶活性的变化与微生物活动和土壤呼吸强度相关。大降雨事件使土壤蔗糖酶活性增加,有利于激活土壤微生物活性,使土壤呼吸产生明显的激增效应^[19]。本研究中,模拟 10 mm 降雨,随首次降雨时间推迟,土壤蔗糖酶活性呈增加趋势;而模拟 15 mm 降雨,土壤蔗糖酶随首次降雨时间推迟呈先增加后下降趋势。在干旱一定时间后,较大的降雨量下土壤蔗糖酶活性反而低于早期同样降雨,可能由于植物生长以及近期大降雨抑制效应等因子综合影响。对腾格里沙漠东南缘小红山地区土壤蔗糖酶活性研究也发现,随土壤水分的增加,土壤蔗糖酶活性呈显著先上升后下降趋势,最大值出现在自然降雨处理中^[14]。除降雨本身影响外,本研究中土壤 pH 与土壤蔗糖酶活性呈负相关,也有可能影响土壤蔗糖酶活性的变化。

脲酶是土壤中重要的水解酶,对土壤中尿素的分解和氮循环起着重要的作用^[45]。研究发现,土壤脲酶活性随着土壤水分的降低而减小^[46]。然而,本研究结果中,土壤脲酶活性不受降雨量的影响。相关性分析也表明,土壤脲酶活性与土壤养分指标无显著相关性。对古尔班通古特沙漠季节性土壤酶研究发现,土壤脲酶活性季节变化明显,与有机碳和土壤水分密切相关^[24]。玛伊努尔·依克木等人通过古尔班通古特沙漠土壤酶活性的季节变化研究发现,脲酶活性在 2—4 月明显上升,4 月份达到峰值,显著高于其他月份,其他月份差异不显著^[47]。推测土壤脲酶春季活性较高的这种效应可能是积雪融水激发,将首次降雨对土壤脲酶活性的影响掩盖,导致积雪融化后不同首次降雨时间及降雨处理效应不显著。土壤脲酶活性的稳定性也可能与荒漠地区土壤养分贫瘠,可供土壤脲酶活性分解的底物少,产生土壤脲酶相关微生物种类少等因素相关。

土壤碱性磷酸酶参与土壤有机磷的转化,对土壤磷的有效性具有重要作用,可加速有机磷的分解^[48]。土壤碱性磷酸酶活性季节变化显著,早春丰富的土壤水分可以促进其活性的增加^[24,49]。本研究表明,和土壤蔗糖酶活性及脲酶活性类似,降雨量的增加对土壤碱性磷酸酶活性影响相对较小(仅在积雪完全融化后第 20 天模拟 15 mm 降雨影响显著)。虽然如此,相关性分析表明,土壤碱性磷酸酶活性与土壤速效磷具有极显著正

相关关系,与前人研究结果一致^[50]。因此,在古尔班通古特沙漠,早春降雨量增加有利于碱性磷酸酶增加,加速土壤磷循环,促进土壤营养元素的转化。

4 结论

在古尔班通古特沙漠,早春积雪完全融化后第 20 天,随降雨量增加,土壤速效氮和碱性磷酸酶活性呈增加趋势,土壤全碳和多酚氧化酶活性显著下降,因此显著提高土壤呼吸及氮磷循环相关微生物活性,抑制碳循环相关酶活性及养分周转。模拟 10 mm 降雨,随首次降雨时间推迟,土壤全氮、速效氮、速效磷、土壤蔗糖酶活性和土壤微生物量碳呈增加趋势,有利于提高土壤呼吸及微生物活性,提高荒漠土壤碳氮磷循环相关的养分转化。相同降雨量在积雪完全融化后不同首次降雨时间模拟添加,大降雨量(15 mm)处理下的效应与其他处理相比较为显著。因此,早春首次降雨时间和降雨量能够影响植物生长旺季的土壤养分及转化潜力,影响荒漠短命植物层片的养分供给的稳定,从而间接导致早春短命植物生长和层片结构发生变化。

参考文献 (References):

- [1] Seneviratne S I, Lüthi D, Litschi M, Schär C. Land-atmosphere coupling and climate change in Europe. *Nature*, 2006, 443(7108): 205-209.
- [2] Hyun S H, Yeh S W. Characteristics of internal variability on summer rainfall in Northeast Asia in a changing climate. *Climate Dynamics*, 2020, 54(1/2): 1179-1195.
- [3] Shortridge J. Observed trends in daily rainfall variability result in more severe climate change impacts to agriculture. *Climatic Change*, 2019, 157(3/4): 429-444.
- [4] Miranda J D, Armas C, Padilla F M, Pugnaire F I. Climatic change and rainfall patterns: effects on semi-arid plant communities of the Iberian Southeast. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75(12): 1302-1309.
- [5] 张腊梅, 刘新平, 赵学勇, 张铜会, 岳祥飞, 云建英. 科尔沁固定沙地植被特征对降雨变化的响应. *生态学报*, 2014, 34(10): 2737-2745.
- [6] Hopkins D W, Sparrow A D, Shillam L L, English L C, Dennis P G, Novis P, Elberling B, Gregorich E G, Greenfield L G. Enzymatic activities and microbial communities in an Antarctic dry valley soil: responses to C and N supplementation. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(9): 2130-2136.
- [7] Gelfand I, Yakir D. Influence of nitrite accumulation in association with seasonal patterns and mineralization of soil nitrogen in a semi-arid pine forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(2): 415-424.
- [8] Huang L, Zhang Z S. Effect of rainfall pulses on plant growth and transpiration of two xerophytic shrubs in a revegetated desert area: Tengger Desert, China. *Catena*, 2016, 137: 269-276.
- [9] 倪梦颖, 张秋芳, 高金涛, 郑永, 周嘉聪, 陈岳民, 杨玉盛. 亚热带杉木人工林土壤胞外酶活性对隔离降雨的季节响应. *生态学报*, 2018, 38(6): 2119-2127.
- [10] Bell C W, Acosta-Martinez V, McIntyre N E, Cox S, Tissue D T, Zak J C. Linking microbial community structure and function to seasonal differences in soil moisture and temperature in a Chihuahuan Desert grassland. *Microbial Ecology*, 2009, 58(4): 827-842.
- [11] Kivlin S N, Treseder K K. Soil extracellular enzyme activities correspond with abiotic factors more than fungal community composition. *Biogeochemistry*, 2014, 117(1): 23-37.
- [12] Sardans J, Peñuelas J, Estiarte M. Changes in soil enzymes related to C and N cycle and in soil C and N content under prolonged warming and drought in a Mediterranean shrubland. *Applied Soil Ecology*, 2008, 39(2): 223-235.
- [13] Ladwig L M, Sinsabaugh R L, Collins S L, Thomey M L. Soil enzyme responses to varying rainfall regimes in Chihuahuan Desert soils. *Ecosphere*, 2015, 6(3): 1-10.
- [14] 许华, 何明珠, 孙岩. 干旱荒漠区土壤酶活性对降水调控的响应. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2018, 54(6): 790-797.
- [15] 万忠梅, 宋长春, 郭跃东, 王丽, 黄靖宇. 毛苔草湿地土壤酶活性及活性有机碳组分对水分梯度的响应. *生态学报*, 2008, 28(12): 5980-5986.
- [16] Henry H A L, Juarez J D, Field C B, Vitousek P M. Interactive effects of elevated CO₂, N deposition and climate change on extracellular enzyme activity and soil density fractionation in a California annual grassland. *Global Change Biology*, 2005, 11(10): 1808-1815.
- [17] Zhou X Q, Chen C R, Wang Y F, Xu Z H, Han H Y, Li L H, Wan S Q. Warming and increased precipitation have differential effects on soil extracellular enzyme activities in a temperate grassland. *Science of the Total Environment*, 2013, 444: 552-558.
- [18] 李帅军, 郭剑芬, 吴东梅, 刘小飞, 林伟盛, 鲍勇. 隔离降雨对米槠天然林土壤微生物生物量和酶活性的影响. *亚热带资源与环境学报*, 2018, 13(1): 17-25.
- [19] 苏慧敏, 李叙勇, 欧阳扬. 土壤微生物量和土壤呼吸对降雨的响应. *生态环境学报*, 2011, 20(10): 1399-1402.
- [20] 张元明, 潘惠霞, 潘伯荣. 古尔班通古特沙漠不同地貌部位生物结皮的选择性分布. *水土保持学报*, 2004, 18(4): 61-64.
- [21] 孙东霞, 杨建成. 古尔班通古特沙漠腹地与周边的降水特征分析. *干旱区地理*, 2010, 33(5): 769-774.

- [22] 张立运, 陈昌笃. 论古尔班通古特沙漠植物多样性的一般特点. 生态学报, 2002, 22(11): 1923-1932.
- [23] Zhou X B, Zhang Y M. Season and nitrogen effects on activities of three hydrolytic enzymes in soils of the Gurbantunggut Desert, Northwest China. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2014, 45(12): 1699-1713.
- [24] Zhou X B, Zhang Y M. Temporal dynamics of soil oxidative enzyme activity across a simulated gradient of nitrogen deposition in the Gurbantunggut Desert, Northwestern China. Geoderma, 2014, 213: 261-267.
- [25] 周宏飞, 周宝佳, 代琼. 古尔班通古特沙漠植物雾凇凝结特征. 水科学进展, 2010, 21(1): 56-62.
- [26] 范连连, 李耀明, Terekhina N, 马学喜, 马杰. 冷荒漠草本植物数量特征对不同水分输入和气象因子的响应. 干旱区研究, 2019, 36(1): 139-146.
- [27] 刘冰, 常学向, 李守波. 黑河流域荒漠区降水格局及其脉动特征. 生态学报, 2010, 30(19): 5194-5199.
- [28] 单立山, 李毅, 段桂芳, 张正中, 张荣, 种培芳. 模拟降雨变化对两种荒漠植物幼苗生长及生物量分配的影响. 干旱区地理, 2016, 39(6): 1267-1274.
- [29] Anniwaer A, Su Y G, Zhou X B, Zhang Y M. Impacts of snow on seed germination are independent of seed traits and plant ecological characteristics in a temperate desert of Central Asia. Journal of Arid Land, 2020, 12(5): 775-790.
- [30] 王雪芹, 蒋进, 雷加强, 张伟民, 钱亦兵. 古尔班通古特沙漠短命植物分布及其沙面稳定意义. 地理学报, 2003, 58(4): 598-605.
- [31] 林大仪. 土壤学实验指导. 中国林业出版社, 2004: 42-107.
- [32] Chen X H, Duan Z H. Impacts of soil crusts on soil physicochemical characteristics in different rainfall zones of the arid and semi-arid desert regions of Northern China. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(7): 3335-3347.
- [33] Zhang L H, Xie Z K, Zhao R F, Zhang Y B. Plant, microbial community and soil property responses to an experimental precipitation gradient in a desert grassland. Applied Soil Ecology, 2018, 127: 87-95.
- [34] 刘禹, 李兴福, 丁成翔, 蒋福祯, 林长存, 维拉, 苏德荣. 短期增水对高寒草甸补播草地植被群落和土壤养分的影响. 草地学报, 2019, 27(6): 1622-1632.
- [35] 朱晓亚, 李子豪, 林启美, 李贵桐, 赵小蓉. 模拟不同春季降雨量下典型草原土壤微生物磷周转特征. 生态学报, 2020, 40(8): 2655-2661.
- [36] Bell C W, Tissue D T, Loik M E, Wallenstein M D, Acosta-Martinez V, Erickson R A, Zak J C. Soil microbial and nutrient responses to 7 years of seasonally altered precipitation in a Chihuahuan Desert grassland. Global Change Biology, 2014, 20(5): 1657-1673.
- [37] Singh J S, Raghubanshi A S, Singh R S, Srivastava S C. Microbial biomass acts as a source of plant nutrients in dry tropical forest and savanna. Nature, 1989, 338(6215): 499-500.
- [38] Zhou X B, Tao Y, Yin B F, Tucker C, Zhang Y M. Nitrogen pools in soil covered by biological soil crusts of different successional stages in a temperate desert in Central Asia. Geoderma, 2020, 366: 114166.
- [39] 吴文超, 岳平, 崔晓庆, 李凯辉, 刘学军. 古尔班通古特沙漠土壤微生物碳氮对环境因子的响应. 干旱区研究, 2018, 35(3): 515-523.
- [40] Henry H A L. Soil extracellular enzyme dynamics in a changing climate. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 47: 53-59.
- [41] Dorodnikov M, Blagodatskaya E, Blagodatsky S, Marhan S, Fangmeier A, Kuzyakov Y. Stimulation of microbial extracellular enzyme activities by elevated CO₂ depends on soil aggregate size. Global Change Biology, 2009, 15(6): 1603-1614.
- [42] Freeman M. Structural biology: enzyme theory holds water. Nature, 2006, 444(7116): 153-155.
- [43] 江森华, 倪梦颖, 周嘉聪, 陈岳民, 杨玉盛. 增温和降雨减少对杉木幼林土壤酶活性的影响. 生态学杂志, 2018, 37(11): 3210-3219.
- [44] 王启兰, 曹广民, 王长庭. 放牧对小嵩草草甸土壤酶活性及土壤环境因素的影响. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5): 856-864.
- [45] Jin K, Sleutel S, Buchan D, De Neve S, Cai D X, Gabriels D, Jin J Y. Changes of soil enzyme activities under different tillage practices in the Chinese Loess Plateau. Soil and Tillage Research, 2009, 104(1): 115-120.
- [46] Sardans J, Peñuelas J. Drought decreases soil enzyme activity in a Mediterranean *Quercus ilex* L. forest. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(3): 455-461.
- [47] 玛伊努尔·依克木, 张丙昌, 买买提明·苏来曼. 古尔班通古特沙漠生物结皮中微生物量与土壤酶活性的季节变化. 中国沙漠, 2013, 33(4): 1091-1097.
- [48] Nannipieri P, Giagnoni L, Landi L, Renella G. Role of phosphatase enzymes in soil//Bünemann E, Oberson A, Frossard E, eds. Phosphorus in Action: Biological Processes in Soil Phosphorus Cycling. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011, 215-243.
- [49] Huxman T E, Snyder K A, Tissue D, Leffler A J, Ogle K, Pockman W T, Sandquist D R, Potts D L, Schwinning S. Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems. Oecologia, 2004, 141(2): 254-268.
- [50] Zhou X B, Zhang Y M, Downing A. Non-linear response of microbial activity across a gradient of nitrogen addition to a soil from the Gurbantunggut Desert, Northwestern China. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 47: 67-77.