



运动场地温调控对高温胁迫下草坪养分动态的影响

张亚楠 李富翠 贾辰雁 范志浩 唐斌 汪梦寒 陈佳宝 韩烈保

Effects of ground temperature regulation on dynamic changes in turf nutrients under high-temperature stress conditions

ZHANG Ya' nan, LI Fucui, JIA Chenyan, FAN Zhihao, TANG Bin, WANG Menghan, CHEN Jiabao, HAN Liebao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0582>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

10个冷季型草坪草品种在高温胁迫下的抗性

Differences in resistance to high temperature stress of 10 cold-season turfgrass varieties

草业科学. 2019, 36(7): 1743 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0529>

外源 γ -氨基丁酸对高温胁迫下黑麦草抗氧化防御系统及激素代谢的影响

Effect of exogenous γ -aminobutyric acid on the antioxidant defense system and phytohormones metabolism under high temperature stress in perennial ryegrass

草业科学. 2019, 36(1): 111 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0133>

放牧对武功山草甸土壤微生物生物量及酶活性的影响

Effects of grazing on soil microbial and biomass enzyme activities in Wugong Mountain, China

草业科学. 2018, 12(7): 1634 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2017-0629>

不同温度下PEG-6000渗透胁迫对歪头菜种子发芽的影响

Effects of osmotic stress by PEG-6000 on germination of *Vicia unijuga* seeds under different temperature conditions

草业科学. 2019, 36(5): 1323 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0122>

艾丁湖盐角草种群动态生命表及其对温度变化的响应

Dynamic life table and response to temperature change of *Salicornia europaea* in Ayding Lake

草业科学. 2017, 11(5): 1064 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0424>

茉莉酸浸种对高温胁迫下多年生黑麦草种子发芽的影响

Effects of jasmonic acid pretreatment on perennial ryegrass seed germination under heat stress

草业科学. 2020, 37(4): 658 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0443>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0582

张亚楠, 李富翠, 贾辰雁, 范志浩, 唐斌, 汪梦寒, 陈佳宝, 韩烈保. 运动场地温调控对高温胁迫下草坪养分动态的影响. 草业科学, 2023, 40(6): 1656-1666.

ZHANG Y, LI F C, JIA C Y, FAN Z H, TANG B, WANG M H, CHEN J B, HAN L B. Effects of ground temperature regulation on dynamic changes in turf nutrients under high-temperature stress conditions. Pratacultural Science, 2023, 40(6): 1656-1666.



运动场地温调控对高温胁迫下 草坪养分动态的影响

张亚楠¹, 李富翠¹, 贾辰雁², 范志浩¹, 唐斌¹,
汪梦寒¹, 陈佳宝¹, 韩烈保¹

(1. 北京林业大学草坪研究所, 北京 100083; 2. 内蒙古蒙草生态环境(集团)股份有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要: 为研究地温调控对高温胁迫下草坪养分动态变化的影响, 本研究以匍匐翦股颖 (*Agrostis stolonifera*) 为试验材料, 以正常生长环境为对照, 地下 20 cm 处控温 27、24、21 °C 为处理, 研究地温调控对草坪草养分吸收、草坪土壤养分动态以及土壤微生物和酶活性的影响。结果表明: 降温促进了匍匐翦股颖生长, 并增加了草坪草生物量, 草坪草氮素和磷素吸收量显著增加, 并且在 21 °C 处理时效果最好, 地上、地下生物量分别比对照增加了 44.3% 和 220.7%, 地下部的氮素、磷素吸收量分别增加了 147.9% 和 179.3%。土壤中矿质氮含量降低, 在 24 °C 处理下 10–20 cm 土层最高降低了 48.5%。土壤速效磷含量增加, 在 21 °C 处理下 0–10 cm 土层最高, 增加了 82.5%。土壤微生物量碳含量随着降温幅度的增加, 呈现先上升后下降的趋势, 而 10–20 cm 土层的微生物量氮含量则呈现上升的趋势, 土壤碳、氮、磷循环相关酶活性普遍受到降温处理影响。综上, 夏季地温调控促进了匍匐翦股颖生长以及草坪草对土壤养分的吸收, 影响了土壤碳、氮、磷循环相关酶活性, 改变相应养分的有效性。此外, 建议夏季运动场降温后适量补充氮肥。

关键词: 翦股颖; 高温胁迫; 地温调控; 养分吸收; 养分动态变化; 微生物量; 酶活性

文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2023)06-1656-11

Effects of ground temperature regulation on dynamic changes in turf nutrients under high-temperature stress conditions

ZHANG Ya'nan¹, LI Fucui¹, JIA Chenyan², FAN Zhihao¹, TANG Bin¹,
WANG Menghan¹, CHEN Jiabao¹, HAN Liebao¹

(1. Turfgrass Research Institute, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Inner Mongolia M-Grass Ecology And Environment (Group) Co., Ltd., Hohhot 010010, Inner Mongolia, China)

Abstract: To study the effects of ground temperature regulation on the dynamic changes in lawn nutrients under high-temperature stress conditions, we used bentgrass and the natural environment as the test material and control, respectively. The soil temperature was controlled at 27, 24, and 21 °C at 20 cm underground as treatments to study their effects on turfgrass nutrient absorption, turf soil nutrient dynamic changes, and soil microbial and enzyme activities. The results indicated that cooling promoted the growth of bentgrass and increased the lawn biomass. Nitrogen and phosphorus uptake by

收稿日期: 2022-07-15 接受日期: 2022-10-12

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金 (BLX201940); 国家自然科学基金面上项目 (31971770)

第一作者: 张亚楠 (1999-), 女, 甘肃靖远人, 在读硕士生, 主要从事运动场草坪研究。E-mail: 1485504297@qq.com

通信作者: 李富翠 (1984-), 女, 河北唐山人, 讲师, 博士, 主要从事草坪养分管理、草地土壤碳氮循环研究。E-mail: li_fucui043@126.com

共同通信作者: 韩烈保 (1965-), 男, 湖北钟祥人, 教授, 博士, 主要从事草坪科学与管理研究。E-mail: hanliebao@163.com

turfgrass significantly increased, and the increasing effect was strongest at 21 °C, with the aboveground and underground biomass being increased by 44.3% and 220.7%, respectively, compared with that in the control. Nitrogen and phosphorus uptake in the underground part increased by 147.9% and 179.3%, respectively. The content of mineral nitrogen in soil decreased, and the highest decrease in the 10–20 cm soil layer was 48.45% at 24 °C. The content of available P in soil increased, and the highest increase was 82.5% in the 0–10 cm soil layer at 21 °C. The soil microbial biomass carbon content increased first and then decreased with an increase in the cooling range, whereas the soil microbial biomass nitrogen content decreased first and then increased in the 10–20 cm soil layer. The activities of enzymes related to soil C, N, and P cycles were generally affected by cooling treatment. In conclusion, soil temperature regulation in summer promotes the growth of bentgrass and uptake of nutrients in the soil by turfgrass, affects the activities of enzymes related to soil C, N, and P cycles, and changes the availability of corresponding nutrients. In addition, it is suggested to serve as a supplement to nitrogen fertilizer after cooling in summer.

Keywords: bentgrass; high-temperature stress; ground temperature regulation; nutrient uptake; dynamic change in nutrients; microbial biomass; enzyme activity

Corresponding author: LI Fucui E-mail: li_fucui043@126.com

HAN Liebao E-mail: hanliebao@163.com

现代体育场馆提供了良好的竞技条件,但由于大量的赛事活动要求,往往无论炎热的夏季还是寒冷的冬季都要在天然草坪上进行赛事活动,同时又需要保证良好的草坪场地性能和条件。为有效解决运动场草坪冬季低温胁迫和夏季高温胁迫,保持较高的草坪质量,确保比赛的正常运行,实现运动场草坪的功能不受季节和气候限制的目标,运动场地温调控技术被广泛地应用到世界各大专业运动场中。

近年来,受气候变暖和温室效应的影响,高温胁迫成为限制冷季型草坪草生长发育的重要因素^[1]。研究表明,高温环境促使草坪质量、叶片相对含水量、抗氧化酶活性、膜稳定性显著下降,对草坪生长造成了严重影响^[2]。当前草坪管理者通常会采用地上风扇通风、提高灌溉频率、提高修剪高度、遮阴等方式使草坪表面降温,从而缓解夏季高温胁迫的影响^[3-4]。此外,张兴波等^[5]通过模拟鸟巢热环境,并对坪床底部通入冷气进行降温,发现其对根系、冠层温度有显著影响,并削弱了热胁迫对草坪的不利影响。

短期的高温胁迫会促进无机态氮的活动,而施加了硝态氮和铵态氮的高羊茅 (*Festuca arundinacea*) 有更高的耐热性^[6]。Sardans 等^[7]研究发现,通过覆盖方式控制增温会对植物水分造成胁迫,使植物吸收氮的能力降低。也有研究表明温度升高使叶片中的氮、钾分配比例增加,且植株单株积累更多的养分^[8]。由此可见,高温对植株的养分利用及分配方式产生

了影响。通常在自然状态下,植物地下部和地上部所处的环境温度有所差异,而现在大部分相关的研究都是针对环境温度的^[9-11]。研究表明,相比外界环境温度,根际土壤温度对植物的生长发育影响更大^[12],根温会直接影响植物的生长,也可通过对光合作用^[13-14]、水分代谢^[15]、矿质营养^[16]等的作用间接改变植物生长状况^[17]。目前大量研究集中于土壤温度对作物生长和生理响应机制的影响^[18-20],或者是基于全球变暖的大环境下的增温对土壤养分供应的影响^[21-23],在高温胁迫下直接采用降低根部温度的缓解方式,会对草坪养分分配利用有何影响尚且未知。

因此,本研究以匍匐翦股颖 (*Agrostis stolonifera*) 草坪为研究对象,通过地下铺设温调系统对草坪土壤进行降温,探究夏季高温胁迫下不同地下降温处理对草坪养分动态变化的影响,以期铺设地温调控系统的运动场草坪合理施肥提供基础理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于北京市清河湾高尔夫球场。草坪草种为‘Penn A-4’(A4) 匍匐翦股颖,试验草坪于2008年建植完成。试验地地处116°39′E, 40°03′N, 海拔37 m,属于暖温带,半湿润大陆性季风气候,夏季炎热多雨。年均气温12 °C,1月份(最冷月)平均

温度为 4.1 ℃, 7 月 (最热月) 平均温度为 26 ℃。全年无霜期 180~200 d, 年降水量 600 mm 以上。试验前土壤基本理化性状如表 1 所列。

1.2 试验设计

试验设 3 个不同温度处理: 地下 20 cm 处温度保持在 27、24、21 ℃, 另以自然温度为对照 (CK), 每个处理和对照重复 4 次, 共 16 个小区, 每个小区面积为 5 m² (1 m × 5 m), 总面积为 80 m²。于 2021 年 7 月 13 日开始降温, 8 月 13 日采集 0—10 和 10—20 cm 土壤及植物样品进行测定。

试验处理所需温度通过地温调控系统控制, 地温调控系统包括土壤温度传感器、温度控制器和地下管道。其温度控制原理为通过温度控制器联动地

下 20 cm 土壤温度传感器控制管道循环冷水 (12 ℃) 来调节降温, 使地下 20 cm 处土壤维持在试验所需温度^[24]。试验地草坪坪床包括根系层 (20 cm)、过渡层 (5 cm)、砾石层 (10 cm) 等, 根系层厚度为 20 cm, 其材料为纯沙, 粒径组成以中、细沙 (74.9%) 为主 (表 2)。2019 年 11 月对草坪坪床进行管道的铺设, 管道埋深 20 cm, 毛细管网间距为 20 mm。试验地安装有微喷灌设备, 试验期间依据天气状况适时灌溉, 每天 1~2 次, 每次 10 min。于 2021 年 4 月降温试验前进行一次施肥, 施用 Greenmaster Organic High N (N:P₂O₅:K₂O=120:5:11), 施入量为 40 g·m⁻², 由清河湾高尔夫球场提供, 降温期间不施肥, 试验期间按照球场正常养护管理进行, 每 1~2 d 进行一次草坪的修剪, 草坪草高度控制在 2.5 mm。

表 1 供试土壤性质
Table 1 Soil properties for testing

土层 Soil layer/cm	处理 Treatment	含水量 Water content/%	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N/ (mg·kg ⁻¹)	铵态氮 NO ₄ ⁺ -N/ (mg·kg ⁻¹)	可溶性有机碳 Dissolved organic carbon/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorous/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium/ (mg·kg ⁻¹)	pH	有机碳 Organic carbon/ (g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen/ (g·kg ⁻¹)	微生物量碳 Microbial biomass carbon/ (mg·kg ⁻¹)	微生物量氮 Microbial biomass nitrogen/ (mg·kg ⁻¹)
0—10	CK	11.72	0.65	2.00	65.4	1.78	54.1	6.33	10.58	0.71	201.2	58.8
	27 ℃	11.77	0.51	1.70	74.9	0.94	47.6	6.41	10.08	0.61	626.7	55.3
	24 ℃	10.72	0.32	1.77	68.7	1.99	52.0	6.28	10.19	0.69	93.8	53.2
	21 ℃	11.44	0.64	1.49	66.6	1.33	51.2	6.19	10.83	0.71	569.1	44.5
10—12	CK	10.31	1.08	0.62	81.1	1.69	33.2	6.34	9.19	0.51	88.1	28.3
	27 ℃	7.94	0.60	0.67	115.6	1.77	33.3	6.30	9.16	0.46	234.2	59.6
	24 ℃	8.49	0.30	0.88	67.3	2.83	35.0	6.36	9.10	0.49	45.5	55.8
	21 ℃	9.26	0.97	0.80	79.2	1.85	44.1	6.32	7.02	0.62	473.2	53.8

27 ℃、24 ℃、21 ℃表示地下20 cm处温度分别保持在27、24和21 ℃, CK表示正常生长环境。下同。
27 ℃, 24 ℃, and 21 ℃ indicate that the temperature at 20 cm underground was maintained at 27, 24, and 21 ℃, respectively, and CK indicates the normal growth environment. This is applicable for the following figures and tables as well.

表 2 粒径分析
Table 2 Particle size analysis

类型 Type	粒径 Particle size (PS)/mm	含量 Content/%
粗砾 Fine gravel	PS > 2.0	4.3
极粗砂 Very coarse sand	1.0 < PS ≤ 2.0	1.7
粗砂 Coarse sand	0.5 < PS ≤ 1.0	19.2
中砂 Medium sand	0.25 < PS ≤ 0.5	41.7
细沙 Fine sand	0.1 < PS ≤ 0.25	25.7
粉粒 Silt	PS < 0.1	7.5

1.3 测定指标和方法

1.3.1 草坪草养分测定

使用直径为 3.5 cm 的土钻在每个小区按 0—10 cm、10—20 cm 随机取 3 个点, 分离地上部与地下部进行植物养分指标测定, 另将 3 个样点的土样混合后过筛 (2 mm) 保存, 进行土壤养分及酶活性的测定。分离出的地上部及地下根系洗去附着泥沙后放入烘箱中于 105 ℃ 杀青 2 h, 然后在 85 ℃ 下烘干至恒重, 称出生物量。烘干后的植株地上部与地下部使用球磨仪 (德国莱驰 MM400 型) 磨细, 采用

H₂SO₄-H₂O₂ 法消煮后, 消煮液用全自动凯氏定氮仪 (Hanon K1100 型) 测定全氮 (total nitrogen, TN) 含量, 用钼锑抗比色法测定全磷 (total phosphorous, TP) 含量^[25]。

1.3.2 草坪土壤养分的测定

土壤含水量采用 105 °C 烘干法测定; 土壤 pH 采用 CaCl₂ 浸提—pH 计测定; 土壤硝态氮 (nitrate nitrogen, NO₃⁻-N)、铵态氮 (ammonium nitrogen, NH₄⁺-N) 含量采用 KCl 浸提—连续流动分析仪测定; 速效磷 (available phosphorous, AP) 采用 NaHCO₃ 浸提—钼锑抗比色法测定; 可溶性有机碳 (dissolved organic carbon, DOC) 含量利用总有机碳分析仪 (Elementar Vario TOC) 测定^[25]。

1.3.3 草坪土壤微生物和酶活性的测定

土壤微生物量碳 (microbial biomass carbon, MBC) 和微生物量氮 (microbial biomass nitrogen, MBN) 采用氯仿熏蒸浸提法测定^[25]。蔗糖酶 (sucrase, SC) 采用 3, 5-二硝基水杨酸 (DNS) 比色法测定, 即蔗糖受土壤蔗糖酶催化后降解产生的还原糖与 DNS 反应生成有色氨基化合物, 其在 540 nm 有特征光吸收, 在一定范围内其 540 nm 光吸收增加速率与土壤酶活性成正比。 β -葡萄糖苷酶 (β -glucosidase, β -GC) 能够催化对-硝基苯- β -D 吡喃葡萄糖苷生成黄色物质对-硝基苯酚 (PNP), 该物质在 405 nm 有特征光吸收, 进而得到 β -GC 的活性。N-乙酰- β -D-氨基葡萄糖苷酶 (N-acetyl- β -D-glucosaminidase, NAG) 分解 4-硝基酚- β -N-乙酰氨基葡萄糖生成对-硝基苯酚 (PNP), 在 405 nm 处检测其升高速率, 进而得到 NAG 活性大小。亮氨酸氨基肽酶 (leucine aminopeptidase, LAP) 分解 L-亮氨酸对硝基苯胺生成对硝基苯胺, 该物质在 405 nm 有最大吸收峰, 通过测定吸光值升高速率来计算 LAP 活性。酸性磷酸酶 (acid phosphatase, ACP) 催化磷酸对硝基苯酯 (PNPP) 生成黄色 PNP, 该物质在 405 nm 有最大吸收峰, 通过检测其在 405 nm 下的增加速率, 进而得到 ACP 活性大小。SC、 β -GC、NAG、LAP、ACP 活性均采用试剂盒测定, 试剂盒购自苏州格锐思生物科技有限公司。

1.4 数据分析

所有数据使用 Excel 2019 进行整理, SPSS 26 进行统计分析, Origin 2019 进行作图。采用单因素方

差分析 (One-way ANOVA) 进行组间的显著性检验; 采用 LSD 进行多重比较, 显著性水平为 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同降温处理对草坪草养分吸收的影响

2.1.1 生物量

夏季降温处理增加了翦股颖草坪地上和地下生物量, 且随着降温幅度的升高, 地上、地下生物量均升高 (图 1)。不同降温处理 (27、24 和 21 °C) 下, 翦股颖草坪地上生物量较 CK 分别增加了 19.5%、43.3% 和 44.3%, 其中 24、21 °C 处理差异显著 ($P < 0.05$); 地下生物量较 CK 分别增加了 110.3%、143.1% 和 220.7%, 其中在 21 °C 降温处理下差异显著 ($P < 0.05$)。翦股颖草坪的根冠比呈上升趋势, 降温处理相较于 CK 差异不显著 ($P > 0.05$)。

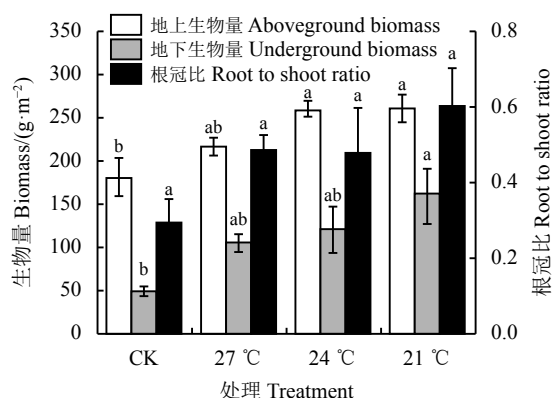


图 1 不同降温处理对匍匐翦股颖生物量的影响
Figure 1 Effects of different cooling treatments on the biomass of *Agrostis stolonifera*

不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$); 下图同。

Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments at the 0.05 level. This is applicable for the following figures as well.

2.1.2 氮素吸收量

夏季降温处理增加了翦股颖草坪地上及地下部的氮素吸收量, 且随着降温幅度的升高, 地上部的氮素吸收量逐渐升高 (图 2)。27、24 和 21 °C 降温处理下, 翦股颖草坪地上氮素吸收量较 CK 分别增加了 1.69%、13.30% 和 20.31%; 地下氮素吸收量 CK 分别增加了 36.63%、29.39% 和 148.87%; 地上和地下氮素吸收量均在 21 °C 处理下与 CK 差异显著 ($P < 0.05$)。

2.1.3 磷素吸收量

夏季降温处理增加了翦股颖草坪地上及地下部

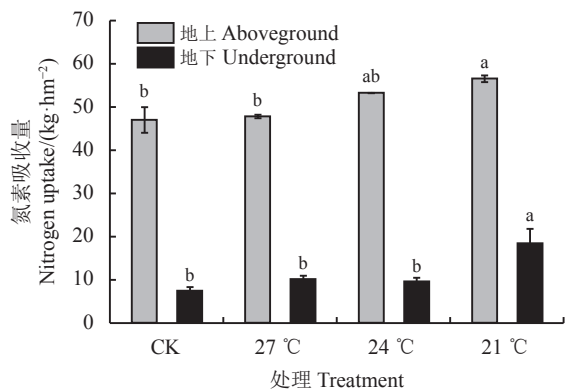


图 2 不同降温处理对匍匐剪股颖氮素吸收的影响
Figure 2 Effects of different cooling treatments on nitrogen uptake in *Agrostis stolonifera*

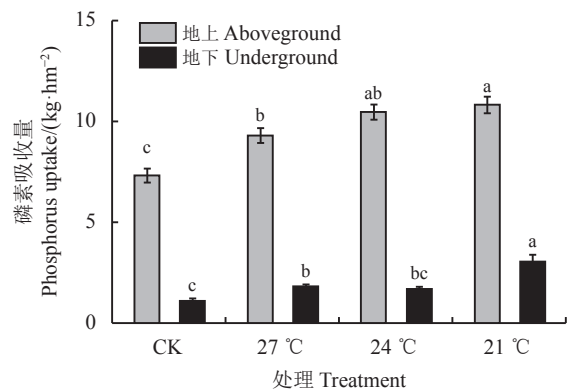


图 3 不同降温处理对匍匐剪股颖磷素吸收的影响
Figure 3 Effects of different cooling treatments on phosphorus uptake in turfgrass

的磷素吸收量,且随着降温幅度的升高,地上部的磷素吸收量逐渐升高(图3)。各降温处理(27、24和21℃)下,草坪地上磷素吸收量较CK分别增加了27.11%、43.00%和47.86%,且均差异显著($P<0.05$);地下磷素吸收量较CK分别增加了66.81%、55.34%和179.34%,其中在27、21℃处理下差异显著($P<0.05$)。

2.2 不同降温处理对土壤养分动态变化的影响

2.2.1 含水量

夏季降温处理降低了剪股颖草坪10—20 cm土层的含水量(表3)。各降温处理(27、24和21℃)下,剪股颖草坪0—10 cm土层的含水量相较于CK无显著差异($P>0.05$),10—20 cm土层的含水量较CK分别降低了21.3%、23.0%和15.1% ($P<0.05$)。

2.2.2 pH

从整体来看,夏季降温处理降低了剪股颖草坪各土层的pH(表3)。在24和21℃降温处理下,其0—10 cm土层的pH相较于CK降低了2.9%和2.6%,且均达到显著水平($P<0.05$)。各降温处理(27、24和21℃)下,10—20 cm土层的pH相较于CK分别降低了0.7%、0.6%和1.2%,其中在21℃降温处理下差异显著($P<0.05$)。

2.2.3 无机态氮

夏季降温处理降低了10—20 cm土层的硝态氮含量及两个土层的铵态氮、矿质氮含量(表3)。与CK相比,27、24和21℃降温处理对剪股颖草坪0—10 cm土层的硝态氮含量无显著影响($P>0.05$),

表 3 不同降温处理对土壤养分动态变化的影响
Table 3 Effects of different cooling treatments on turf soil nutrient dynamic changes

土层 Soil layer/cm	处理 Treatment	含水量 Water content/%	pH	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N/ (mg·kg ⁻¹)	铵态氮 NO ₄ ⁺ -N/ (mg·kg ⁻¹)	矿质氮 Mineral nitrogen (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorous/ (mg·kg ⁻¹)	可溶性有机碳 Dissolved organic carbon/(mg·kg ⁻¹)
0—10	CK	9.06 ± 0.33a	6.63 ± 0.02a	3.87 ± 0.12a	4.09 ± 0.13a	8.05 ± 0.05a	0.24 ± 0.02b	19.78 ± 2.62a
	27 °C	9.04 ± 0.17a	6.69 ± 0.01a	3.87 ± 0.19a	1.37 ± 0.05c	5.07 ± 0.10b	0.25 ± 0.01b	19.35 ± 2.54a
	24 °C	9.26 ± 0.30a	6.44 ± 0.03b	4.20 ± 0.14a	0.92 ± 0.19d	5.19 ± 0.34b	0.41 ± 0.03a	18.20 ± 1.23a
	21 °C	9.44 ± 0.21a	6.46 ± 0.02b	4.11 ± 0.32a	2.10 ± 0.02b	6.01 ± 0.35b	0.44 ± 0.05a	22.96 ± 3.93a
10—20	CK	9.53 ± 0.20a	6.74 ± 0.02a	4.01 ± 0.09a	0.42 ± 0.11ab	4.09 ± 0.04a	0.14 ± 0.01ab	17.72 ± 2.77a
	27 °C	7.50 ± 0.28b	6.69 ± 0.02ab	1.71 ± 0.11c	0.53 ± 0.11ab	2.51 ± 0.13b	0.12 ± 0.01b	17.31 ± 1.15a
	24 °C	7.34 ± 0.25b	6.70 ± 0.01ab	1.52 ± 0.10c	0.67 ± 0.06a	2.11 ± 0.05c	0.15 ± 0.01ab	15.24 ± 0.88a
	21 °C	8.09 ± 0.31b	6.66 ± 0.02b	2.07 ± 0.09b	0.22 ± 0.06b	2.23 ± 0.03bc	0.19 ± 0.02a	15.54 ± 1.48a

同列不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著($P<0.05$); 下表同。
Different lowercase letters within the same column indicate significant differences among different treatments within the same soil layer at the 0.05 level. This is applicable for the following tables as well.

但降低了 10—20 cm 土层的硝态氮含量, 分别较 CK 降低了 57.42%、62.07% 和 48.28% ($P < 0.05$)。0—10 cm 土层的铵态氮和矿质氮含量相较于 CK 降低了 66.36% 和 77.46%、48.52% 和 36.96%、35.48% 和 25.37% ($P < 0.05$); 10—20 cm 土层的矿质氮含量相较于 CK 降低了 38.57%、48.45% 和 45.37% ($P < 0.05$)。在 27 和 24 °C 降温处理下, 10—20 cm 土层的铵态氮含量相较于 CK 增加了 25.54% 和 59.43% ($P > 0.05$), 在 21 °C 降温处理下, 其相较于 CK 降低了 46.71% ($P > 0.05$)。

2.2.4 速效磷

夏季降温处理提升了翦股颖草坪 0—10 cm 土层的速效磷含量(表 3)。各降温处理下, 0—10 cm 土层的速效磷含量相较于 CK 分别增加了 3.0%、69.5% 和 82.5%, 其中在 24、21 °C 处理下差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。10—20 cm 土层中速效磷含量相较于表土层普遍降低, 与 CK 相比, 27 °C 处理降低了 14.5%, 24 和 21 °C 处理分别提升了 7.5% 和 36.6% ($P > 0.05$)。

2.2.5 可溶性有机碳

夏季降温处理对翦股颖草坪各土层的可溶性有机碳含量无显著影响 ($P > 0.05$) (表 3)。在 27 和 24 °C 处理下, 0—10 cm 土层的可溶性有机碳含量与 CK 相比分别降低了 2.15% 和 7.99%, 在 21 °C 处理下, 其可溶性有机碳含量较 CK 处理增加了 16.11% ($P > 0.05$)。各降温处理 (27、24 和 21 °C) 下,

10—20 cm 土层可溶性有机碳含量相较于 CK 分别降低了 2.32%、14.01% 和 12.29% ($P > 0.05$)。

2.3 不同降温处理对土壤微生物量碳氮和酶活性的影响

2.3.1 微生物量碳

夏季降温处理下, 翦股颖草坪两个土层的微生物量碳含量随着降温幅度的增加, 呈现先上升后下降的趋势, 且均在 24 °C 处理下达到最高值(表 4)。各降温处理 (27、24 和 21 °C) 下, 0—10 cm 土层微生物量碳含量相较于 CK 分别提升了 52.53%、124.38% 和 105.05%, 且差异均达到显著水平 ($P < 0.05$)。在 27 和 24 °C 处理下, 10—20 cm 土层微生物量碳含量相较于 CK 分别提升了 44.44% 和 119.11%, 在 21 °C 处理下, 其微生物量碳含量降低了 89.47% ($P < 0.05$)。

2.3.2 微生物量氮

夏季降温处理降低了翦股颖草坪 0—10 cm 土层微生物量氮含量, 10—20 cm 土层呈现先降低后升高的趋势(表 4), 在各降温处理 (27、24 和 21 °C) 下, 0—10 cm 土层微生物量氮的含量相较于 CK 分别降低了 8.35%、70.62% 和 69.19%, 其中在 24 和 21 °C 处理下有显著差异 ($P < 0.05$); 在 27 °C 处理下, 10—20 cm 土层微生物量氮含量相较于 CK 降低了 83.08%, 在 24 °C 和 21 °C 处理下, 其微生物量氮含量相较于 CK 分别增高了 52.25% 和 555.61%, 其中在 21 °C 处理下差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。

表 4 不同降温处理对土壤微生物量和酶活性的影响
Table 4 Effects of different cooling treatments on soil microbial biomass and enzyme activities

土层 Soil layer/ cm	处理 Treatment	微生物量碳 Microbial biomass carbon/ (mg·kg ⁻¹)	微生物量氮 Microbial biomass nitrogen/ (mg·kg ⁻¹)	蔗糖酶 活性 Sucrase activity/ [mg·(d·g) ⁻¹]	β-葡萄糖苷 酶活性 β-glucosidase activity/ [nmol·(h·g) ⁻¹]	N-乙酰-β-D-氨基 葡萄糖苷酶 N-acetyl-β-D-glucosaminidase/ [nmol·(h·g) ⁻¹]	亮氨酸氨 基肽酶 Leucine aminopeptidase/ [nmol·(h·g) ⁻¹]	酸性磷 酸酶 Acid phosphatase/ [nmol·(h·g) ⁻¹]
0—10	CK	0.79 ± 0.03c	7.70 ± 0.72a	1.77 ± 0.01b	46.62 ± 8.47b	69.49 ± 0.22a	155.72 ± 21.25a	436.14 ± 16.21a
	27 °C	1.21 ± 0.12b	7.06 ± 0.94a	1.77 ± 0.01b	89.06 ± 5.90ab	45.36 ± 6.88a	145.73 ± 11.66a	395.66 ± 41.37a
	24 °C	1.78 ± 0.04a	2.26 ± 0.03b	1.77 ± 0.03b	148.41 ± 24.57a	76.36 ± 4.79a	192.84 ± 3.02a	406.16 ± 14.87a
	21 °C	1.63 ± 0.00a	2.37 ± 0.07b	2.01 ± 0.04a	114.11 ± 10.93a	59.24 ± 16.72a	200.32 ± 23.43a	456.46 ± 4.74a
10—20	CK	1.71 ± 0.21c	0.89 ± 0.23bc	2.07 ± 0.29a	26.48 ± 2.86a	32.55 ± 1.41a	63.20 ± 2.52a	212.11 ± 21.43b
	27 °C	2.47 ± 0.20b	0.15 ± 0.03c	1.98 ± 0.25a	13.97 ± 5.93ab	25.36 ± 3.81a	50.70 ± 4.54ab	201.36 ± 5.32b
	24 °C	3.75 ± 0.02a	1.35 ± 0.10b	1.73 ± 0.01a	12.42 ± 1.79ab	12.11 ± 1.52b	28.69 ± 8.88bc	174.94 ± 2.75b
	21 °C	0.18 ± 0.01d	5.81 ± 0.34a	1.77 ± 0.03a	5.50 ± 0.73b	2.99 ± 0.45b	14.27 ± 2.20c	319.38 ± 17.91a

2.3.3 土壤碳循环相关酶

整体来看,降温处理对翦股颖草坪土壤蔗糖酶活性影响不大,但对于 β -葡萄糖苷酶活性来说,增加了0—10 cm表层的活性,降低了10—20 cm次表层的活性(表4)。21℃降温处理提高了0—10 cm土层蔗糖酶活性,相较于CK增加了13.96% ($P < 0.05$); 10—20 cm土层蔗糖酶活性在各降温处理下均无显著差异 ($P > 0.05$)。各降温处理(27、24和21℃)下,0—10 cm土层 β -葡萄糖苷酶活性相较于CK增加了91.02%、218.32%和144.75%,其中在24和21℃处理下差异显著 ($P < 0.05$), 10—20 cm土层 β -葡萄糖苷酶活性相较于CK降低了47.26%、53.10%和79.24%,其中在21℃处理下与CK差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。

2.3.4 土壤氮循环相关酶

夏季降温处理对0—10 cm土层N循环相关酶活性并无显著影响,但降低了10—20 cm土层N循环相关酶活性,且随着降温幅度的增加,其活性不断降低(表4)。各降温处理下,10—20 cm土层N-乙酰- β -D-氨基葡萄糖苷酶活性相较于CK降低了22.08%、62.79%和90.82%,其中在24和21℃处理下有显著差异 ($P < 0.05$), 10—20 cm土层亮氨酸氨基肽酶活性相较于CK降低了19.78%、54.60%和77.42%,其中在21℃处理下与CK差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。

2.3.5 土壤磷循环相关酶

夏季不同降温处理对翦股颖草坪各土层酸性磷酸酶活性整体无影响,仅在10—20 cm次表层21℃处理下升高了(表4)。两土层酸性磷酸酶活性在27和24℃处理下均降低,但并无显著差异 ($P > 0.05$),在21℃处理下,0—10 cm和10—20 cm土层酸性磷酸酶活性相较于CK分别增加了4.66%和50.58%,其中10—20 cm土层酸性磷酸酶活性在21℃处理时与CK差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 降温处理对草坪草养分吸收的影响

本研究中,夏季对土壤降温处理增加了翦股颖草坪地上和地下生物量(图1),这与陈才夫等^[26]的研究结果一致。夏季高温使植物叶片失水、根系失活,从而抑制其生长发育,降温处理后,草坪各部位

在适宜温度下所受的抑制效果减弱,其生长发育相对变快,各部位的生物量有所提升。

夏季不同降温处理对植物地上地下部氮素吸收量有显著影响,降温后植物各部氮素吸收量呈上升趋势(图2)。有研究表明,温度升高会加快植物呼吸消耗,缩短作物的生长发育时间,降低其生物量,使得其需氮量下降^[27],与本研究结果一致。在本研究中,未进行降温处理,处于夏季高温环境下的草坪的生物量明显较低,且其地上、地下的氮素吸收量也低于降温处理,而降温后,植物生长发育时间增加,其生物量提升,各部的氮素吸收量随之增加。

有研究表明,一定范围内,随着根际pH下降,植物磷素吸收量逐渐增高,两者有很好的相关性^[28],这与本研究结果一致,降温处理后0—20 cm土层的pH下降(表3),草坪地上和地下的磷素吸收量也逐渐增加用于其生长发育。此外,由于植物在生长过程中需要维持相对稳定的氮磷比^[29],故随植株需氮量的增加,其磷素吸收量也随之增加。本研究认为,地温调控的降温处理会促进夏季高温胁迫下草坪草养分的吸收,其中在21℃处理下效果最显著。

3.2 降温处理对土壤养分动态变化的影响

本研究中,各降温处理下,翦股颖草坪0—10 cm土层含水量并无差异,而其10—20 cm土层含水量在降温后显著降低(表3)。高红贝^[30]研究表明,随着温度的升高,相同时间下入渗过程中湿润锋距离和累积入渗量不断加大,土壤入渗速率加快。这与本研究的结果相符合,可能是由于温度降低,改变了其土壤水的表面张力和粘滞系数,使其入渗速率减慢,造成土壤表层含水量无差异,但10—20 cm土层含水量降低的情况。

土壤矿质氮是硝态氮和铵态氮的总和,植物生长发育与土壤含氮量显著相关。在本研究中,降温处理降低了各土层的矿质氮含量(表3)。巨晓棠和李生秀^[31]研究表明,温度和水分对土壤矿质氮含量均有正向调节作用,这与本研究的结果相同,除温度与水分的影响作用外,土壤中矿质氮含量的降低与植株需氮量增加,大量吸收氮素也有一定的关系。土壤水分是硝态氮运移的主要载体,本研究中土壤硝态氮与含水量的变化(表3)趋势完全一致。

本研究中,随着土壤温度的降低,表土层和次表层的土壤速效磷含量均随之增加(表3),可能是

因为降温处理降低了土壤 pH, 而 pH 是影响土壤中磷有效性的重要环境因子。有研究表明, pH 降低会导致土壤中磷酸钙溶解度增加^[32], 提升土壤中磷的有效性, 释放出更多可供植物吸收的速效磷, 这与本研究的结果完全一致。

Christ 等^[33]研究表明, 随着土壤温度的降低, 土壤有机碳的矿化和转化速率降低, 土壤中的可溶性有机碳的含量降低, 而本研究中, 10—20 cm 土层的可溶性有机碳含量随着温度的降低有降低的趋势, 但差异并不显著 (表 3), 可能是因为 Christ 等^[33]的温度处理为 10、20 °C, 而本研究的温度处理分别为 21、24、27 °C, 梯度较小, 所以对可溶性有机碳的影响不大。

3.3 降温处理对土壤微生物和酶活性的影响

降温处理中, 翦股颖草坪的土壤微生物量碳含量随着温度的降低而升高 (表 4), 可能是因为微生物生物量由根系分泌和分解, 而降温后其地上地下生物量均有了提升^[34], 根系增多造成其土壤微生物量碳含量升高, 然而在 21 °C 处理下, 其土壤微生物量碳含量有所下降, 可能是因为降温幅度过大, 土壤温度低于微生物体内酶的最适温度区间, 使其活性降低, 同时造成土壤微生物的适应性降低, 大量土壤微生物失活, 数量减少^[35]。

目前有关温度与土壤微生物量氮关系的研究结果并不一致^[36-37]。本研究中, 翦股颖草坪两个土层微生物量氮含量对降温处理的响应完全相反, 不同降温处理下, 0—10 cm 土层微生物量氮含量随温度降低而降低, 而 10—20 cm 土层微生物量氮含量随温度降低而上升 (表 4)。产生这样的结果可能是因为增温抑制微生物活性^[10], 导致微生物对养分的利用效率降低, 降低了微生物量氮的含量, 而 0—10 cm 土层微生物量氮含量呈现相反的规律可能是因为降温后草坪的养分需求量增多, 氮素吸收量同时增加, 翦股颖的根系多分布在 0—10 cm 土层, 随着大量氮素被草坪草吸收, 这部分土壤中的氮素含量不足, 微生物则释放体内的氮素, 补充土壤中氮素养分的缺乏, 于是 0—10 cm 土层微生物量氮含量降低。

蔗糖酶和 β -葡萄糖苷酶是两种 C 循环相关酶。蔗糖酶把土壤中蔗糖分子分解成能够被植物和土壤微生物吸收利用的葡萄糖和果糖, 增加了土壤中易溶性营养物质^[38]。 β -葡萄糖苷酶可以降解纤维

素, 将纤维素二糖水解为葡萄糖, 为根际土壤微生物提供能量^[39]。有研究表明, 夏季土壤 β -葡萄糖苷酶活性与土壤温度呈负相关关系^[7], 然而在本研究中, 翦股颖草坪 10—20 cm 土层 β -葡萄糖苷酶活性与土壤温度呈正相关关系 (表 4), 可能是因为降温使这一土层的含水量降低, 而水分的减少限制了酶和底物的扩散, 所以也呈下降的趋势。10—20 cm 土层可溶性有机碳含量和 β -葡萄糖苷酶活性变化趋势一致, 说明相比于蔗糖酶, 土壤温度与 β -葡萄糖苷酶活性和可溶性有机碳含量有更好的相关性。

N-乙酰- β -D-氨基葡萄糖苷酶和亮氨酸氨基肽酶是与 N 循环相关的酶。N-乙酰- β -D-氨基葡萄糖苷酶可以降解几丁质和肽聚糖, 将壳二糖水解为氨基葡萄糖, 为植物和微生物提供氮素养分^[39]。而亮氨酸氨基肽酶则起到水解蛋白质和多肽的作用^[40]。本研究中草坪土壤中亮氨酸氨基肽酶活性与矿质氮的变化趋势一致, 两种草坪的 10—20 cm 土层受温度影响更显著 (表 4), 可能是因为降温装置处于地下 20 cm 处, 距离其越近的土壤受到的影响越大, 而氮素养分与土壤含水量有密切的联系, 本研究中的土壤矿质氮含量可能受到了亮氨酸氨基肽酶活性与土壤含水量等因素多重作用的影响。

酸性磷酸酶能促进土壤有机磷化合物的分解, 为植物提供有效磷素, 酸性磷酸酶活性变化一定程度上反映了土壤磷素有效性的变化^[41]。本研究结果表明, 降温处理使翦股颖草坪土壤中速效磷含量增多, 而对酸性磷酸酶活性影响规律不明显 (表 4), 可能是因为土壤酸性磷酸酶活性受土壤有机质、物理性状等多方面交互影响^[42]。

4 结论

在高温胁迫下, 采取地下降温措施会有效促进匍匐翦股颖的生长, 增加地上和地下生物量, 促进草坪草对氮磷养分的吸收。不同降温处理影响了土壤 C、N、P 循环相关酶活性, 改变了相应养分的有效性。降温处理下 pH 降低, 同时土壤中无机态氮含量显著下降, 但增加了速效磷的含量, 对可溶性有机碳含量无显著影响, 增加了土壤微生物量碳含量和 10—20 cm 土层微生物量氮含量, 降低了 0—10 cm 土层的微生物量氮含量。因此, 夏季运动场采取地下降温措施后需要适量补充氮肥以满足植物生长需求。

参考文献 References:

- [1] 江宏娟, 李建龙, 李良霞. 高温胁迫下水肥耦合对高羊茅生态性状的影响. *草业科学*, 2009, 26(7): 152-157.
JIANG H J, LI J L, LI L X. Effect of water and fertilizer coupling on ecological characters of *Festuca arundinacea* under heat stress. *Pratacultural Science*, 2009, 26(7): 152-157.
- [2] YANG Z, MIAO Y, YU J, LIU J, HUANG B. Differential growth and physiological responses to heat stress between two annual and two perennial cool-season turfgrasses. *Scientia Horticulturae*, 2014, 170: 75-81.
- [3] LIU X, HUANG B. Mowing height effects on summer turf growth and physiological activities for two creeping bentgrass cultivars. *HortScience*, 2003, 38(3): 444-448.
- [4] RODRIGUEZ I R, MCCARTY L B, TOLER J E. Effects of misting and subsurface air movement on bentgrass putting greens. *Agronomy Journal*, 2005, 97(5): 1438-1442.
- [5] 张兴波, 王兆龙, 孙吉雄. 坪床控温对模拟鸟巢式体育场热效应调控的研究. *草原与草坪*, 2008(1): 18-21.
ZHANG X B, WANG Z L, SUN J X. Study on temperature control of turf soil for simulated stadium. *Grassland and Turf*, 2008(1): 18-21.
- [6] 江宏娟, 李建龙, 李良霞, 王艳. 高温胁迫下不同氮肥处理对高羊茅氮代谢的影响. *草业科学*, 2009, 26(3): 102-107.
JIANG H J, LI J L, LI L X, WANG Y. Effect of nitrogen fertilization on nitrogen metabolism of *Festuca arundinacea* under heat stress. *Pratacultural Science*, 2009, 26(3): 102-107.
- [7] 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.
- [8] 侯颖, 王开运, 张超. 大气二氧化碳浓度与温度升高对红桦幼苗养分积累和分配的影响. *应用生态学报*, 2008(1): 13-19.
HOU Y, WANG K Y, ZHANG C. Effect of elevated CO₂ concentration and temperature on nutrient accumulation and allocation in *Betula albo-sinensis* seedlings. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008(1): 13-19.
- [9] 马丹丹, 王瑾瑜. 长期增温对荒漠草原短花针茅群落组成和土壤养分及酶活性特征的影响. *甘肃农业大学学报*, 2020, 55(3): 144-153.
MA D D, WANG J Y. Effect of long-term warming on community composition, soil nutrients and enzyme activities of *Stipa breviflora* desert steppe. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2020, 55(3): 144-153.
- [10] ALLISON S D, TRESEDER K K. Warming and drying suppress microbial activity and carbon cycling in boreal forest soils. *Global Change Biology*, 2008, 14(12): 2898-2909.
- [11] WEEDON J T, KOWALCHUK G A, AERTS R, HAL J, LOGTESTIJN R, TAŞ N, RÖLING W F M, BODEGOM P M. Summer warming accelerates sub-arctic peatland nitrogen cycling without changing enzyme pools or microbial community structure. *Global Change Biology*, 2012, 18(1): 138-150.
- [12] 李仁杰, 朱世东, 袁凌云, 龙杰, 单国雷. 温室内地温变化规律及与气温的相关性. *中国农学通报*, 2010, 26(24): 209-212.
LI R J, ZHU S D, YUAN L Y, LONG J, SHAN G L. Study on the soil temperature variety regulation and the relativity with atmosphere temperature in the greenhouse. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(24): 209-212.
- [13] YAMORI N, LEVINE C P, MATTSON N S, YAMORI W. Optimum root zone temperature of photosynthesis and plant growth depends on air temperature in lettuce plants. *Plant Molecular Biology*, 2022, 110(4/5): 385-395.
- [14] HE Y, YANG J, ZHU B, ZHU Z. Low root zone temperature exacerbates the ion imbalance and photosynthesis inhibition and induces antioxidant responses in tomato plants under salinity. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(1): 89-99.
- [15] 李孟南, 张誉稳, 毕玉芬, 赵雁. 根际高温对德钦苜蓿形态特征及水分状况的影响. *西部林业科学*, 2018, 47(6): 22-29.
LI M N, ZHANG Y W, BI Y F, ZHAO Y. Effects of high rhizosphere characteristics and water temperature stress on morphological status of 'Deqin' *Medicago sativa*. *Journal of West China Forestry Science*, 2018, 47(6): 22-29.
- [16] 邱尧, 周冀衡, 黄劭理, 李强, 张毅, 刘晓颖. 根部温度和氮素形态互作对烤烟生长和钾素积累的影响. *中国烟草学报*, 2015, 21(3): 88-92.
QIU Y, ZHOU J H, HUANG S L, LI Q, ZHANG Y, LIU X Y. Interaction effects of root temperature and nitrogen form on growth of and potassium accumulation in flue-cured tobacco. *Acta Tabacaria Sinica*, 2015, 21(3): 88-92.
- [17] 易建华, 贾志红, 孙在军. 不同根系土壤温度对烤烟生理生态的影响. *中国生态农业学报*, 2008(1): 62-66.

- YI J H, JIA Z H, SUN Z J. Physiological and ecological effect of rhizospheric soil temperature on flue-cured tobacco. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008(1): 62-66.
- [18] 李龙兴, 王志伟, 陈莹. 高温胁迫对5种牧草生理生化特性的影响. *草原与草坪*, 2019, 39(4): 107-111.
LI L X, WANG Z W, CHEN Y. Effects of high temperature stress on physiological and biochemical characteristics of five forages. *Grassland and Turf*, 2019, 39(4): 107-111.
- [19] 王日明, 熊兴耀. 高温胁迫对黑麦草生长及生理代谢的影响. *草业学报*, 2016, 25(8): 81-90.
WANG R M, XIONG X Y. Effects of temperature stress on growth and metabolism in perennial ryegrass. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(8): 81-90.
- [20] 张巨明, 解新明, 董朝霞. 高温胁迫下冷季型草坪草的耐热性评价. *草业科学*, 2007, 24(2): 105-109.
ZHANG J M, XIE X M, DONG Z X. An evaluation on the heat tolerance of cool-season turf grasses under field heat stress. *Pratacultural Science*, 2007, 24(2): 105-109.
- [21] 徐振锋, 唐正, 万川, 熊沛, 曹刚, 刘庆. 模拟增温对川西亚高山两类针叶林土壤酶活性的影响. *应用生态学报*, 2010, 21(11): 2727-2733.
XU Z F, TANG Z, WAN C, XIONG P, CAO G, LIU Q. Effects of simulated warming on soil enzyme activities in two subalpine coniferous forests in west Sichuan. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(11): 2727-2733.
- [22] 闫秋艳, 段增强, 李汛, 董金龙, 王媛华, 邢鹏, 董飞. 根区温度对黄瓜生长和土壤养分利用的影响. *土壤学报*, 2013, 50(4): 752-760.
YAN Q Y, DUAN Z Q, LI X, DONG J L, WANG A H, XING P, DONG F. Effects of root zone temperature on growth of cucumber and nutrient utilization in soils. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(4): 752-760.
- [23] 李娜, 王根绪, 高永恒, 王俊峰, 柳林安. 模拟增温对长江源区高寒草甸土壤养分状况和生物学特性的影响研究. *土壤学报*, 2010, 47(6): 1214-1224.
LI N, WANG G X, GAO Y H, WANG J F, LIU L A. Effects of simulated warming on soil nutrients and biological characteristics of alpine meadow in the head waters region of the Yangtze River. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(6): 1214-1224.
- [24] 范志浩, 宋桂龙, 陈佳宝, 唐斌, 窦玮豪, 张亚楠, 李富翠, 陈雨峰, 韩烈保, 贾辰雁. 地温调控对高温胁迫下剪股颖草坪土壤温度、草坪质量和根系生长的作用. *草业科学*, 2022, 39(1): 57-65.
FAN Z H, SONG G L, CHEN J B, TANG B, DOU W H, ZHANG Y N, LI F C, CHEN Y F, HAN L B, JIA C Y. Effects of soil temperature regulation on soil temperature, turf quality and root growth of Pruning turf under high temperature stress. *Pratacultural Science*, 2022, 39(1): 57-65.
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000: 264-269.
BAO S D. Soil and Agricultura Chemistry Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 264-269.
- [26] 陈才夫, 梁祖铎, 王槐三. 多年生黑麦草对高温、干旱的生理反应. *南京农业大学学报*, 1988(2): 87-92.
CHEN C F, LIANG Z D, WANG H S. Physiological responses of perennial ryegrass to high temperature and drought. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1988(2): 87-92.
- [27] LI C, ZHU J, SHA L, ZHANG J, ZENG Q, LIU G. Rice (*Oryza sativa* L.) growth and nitrogen distribution under elevated CO₂ concentration and air temperature. *Ecological Research*, 2017, 32(3): 405-411.
- [28] 刘世亮, 介晓磊, 李有田, 丁克强, 安志装. 土壤—植物根际磷的生物有效性研究进展. *土壤与环境*, 2002, 11(2): 178-182.
LIU S L, JIE X L, LI Y T, DING K Q, AN Z Z. Advance of study on phosphorus bioavailability in the soil—plant rhizosphere. *Soil and Environment*, 2002, 11(2): 178-182.
- [29] GOODALE C L, ABER J D, MCDOWELL W H. The long-term effects of disturbance on organic and inorganic nitrogen export in the White Mountains, New Hampshire. *Ecosystems*, 2000, 3(5): 433-450.
- [30] 高红贝. 温度对土壤水分运动及参数的影响研究. 杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2011.
GAO H B. Research on the effect of temperature on soil water movement and parameters. Master Thesis. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University, 2011.
- [31] 巨晓棠, 李生秀. 土壤氮素矿化的温度水分效应. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(1): 37-42.
JU X T, LI S X. The effect of temperature and moisture on nitrogen mineralization in soils. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*,

- 1998, 4(1): 37-42.
- [32] HINSINGER P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: A review. *Plant and Soil*, 2001, 237(2): 173-195.
- [33] CHRIST M J, DAVID M B. Temperature and moisture effects on the production of dissolved organic carbon in a Spodosol. *Soil Biology & Biochemistry*, 1996, 28(9): 1191-1199.
- [34] NIU S, WU M, HAN Y, XIA J, LI L, WAN S. Water-mediated responses of ecosystem carbon fluxes to climatic change in a temperate steppe. *The New Phytologist*, 2008, 177(1): 209-219.
- [35] 奚晶阳, 白炜, 尹鹏松, 刘永万. 模拟增温对长江源区高寒沼泽草甸土壤有机碳组分与植物生物量的影响研究. *生态科学*, 2019, 38(1): 92-101.
- XI J Y, BAI W, YIN P S, LIU Y W. Effects of simulated warming on soil organic carbon composition and biomass in alpine swap meadow in the headwaters region of the Yangtze River. *Ecological Science*, 2019, 38(1): 92-101.
- [36] 唐偲頔, 郭剑芬, 张政, 蔡小真, 杨玉盛. 增温和隔离降雨对杉木幼林土壤养分和微生物生物量的影响. *亚热带资源与环境学报*, 2017, 12(1): 40-45.
- TANG C D, GUO J F, ZHANG Z, CAI X Z, YANG Y S. Effects of warming and precipitation exclusion on soil nutrients and microbial biomass in young Chinese fir plantation. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2017, 12(1): 40-45.
- [37] FREY S D, DRIJBER R, SMITH H, MELILLO J. Microbial biomass, functional capacity, and community structure after 12 years of soil warming. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(11): 2904-2907.
- [38] 李源. 东北黑土氮素转化和酶活性对水热条件变化的响应. 长春: 东北师范大学硕士学位论文, 2015.
- LI Y. The influence of hydrothermal conditions change on nitrogen transformation and enzyme activities in black soil in Northeast China. Master Thesis. Changchun: Northeast Normal University, 2015.
- [39] 刘霜, 张心昱. 不同植物根际土壤碳氮水解酶活性热点区的空间分布特征. *生态学报*, 2020, 40(13): 4462-4469.
- LIU S, ZHANG X Y. Spatial distribution of carbon and nitrogen acquiring hydrolase activity hotspots in rhizosphere soils of different plants. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(13): 4462-4469.
- [40] 王冰冰, 曲来叶, 马克明, 张心昱, 宋成军. 岷江上游干旱河谷优势灌丛群落土壤生态酶化学计量特征. *生态学报*, 2015, 35(18): 6078-6088.
- WANG B B, QU L Y, MA K M, ZHANG X Y, SONG C J. Patterns of ecoenzymatic stoichiometry in the dominant shrubs in the semi-arid upper Minjiang River Valley. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(18): 6078-6088.
- [41] 申卫收, 林先贵, 张华勇, 尹睿, 段增强, 施卫明. 不同栽培条件下蔬菜塑料大棚土壤氮磷生物转化特征. *农业工程学报*, 2008, 24(2): 199-204.
- SHEN W H, LIN X G, ZHANG H Y, YIN R, DUAN Z Q, SHI W M. Biological transformation characteristics of N and P in different polytunnel greenhouses vegetable soils. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(2): 199-204.
- [42] 贾继文, 聂俊华, 李絮花, 宋付朋, 桑卫民. 蔬菜大棚土壤理化性状与土壤酶活性关系的研究. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2001, 32(4): 427-432.
- JIA J W, NIE J H, LI X H, SONG F P, SANG W M. Study on the relationship between the soil physical-chemical properties and soil enzymatic activity of plastic greenhouse. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science)*, 2001, 32(4): 427-432.

(责任编辑 魏晓燕)