

DOI:10.11686/cyxb2020098

<http://cyxb.magtech.com.cn>

张宁, 曹允馨, 徐伟, 等. 干旱胁迫下污泥对草地早熟禾生长及激素代谢的影响. 草业学报, 2021, 30(3): 167—176.

ZHANG Ning, CAO Yun-xin, XU Wei, *et al.* Effects of biosolids on the growth and auxin metabolism of *Poa pratensis* under drought stress. Acta Prata-culturae Sinica, 2021, 30(3): 167—176.

干旱胁迫下污泥对草地早熟禾生长及激素代谢的影响

张宁, 曹允馨, 徐伟, 常智慧*

(北京林业大学草业与草原学院, 北京 100083)

摘要:污泥可用作土壤改良剂和生物肥料,改善绿地土壤的理化性质,促进植物的生长。在相同供氮水平和两种水分条件下,采用裂区设计(主处理:干旱胁迫和充分浇水;副处理:吲哚丁酸、污泥、添加色氨酸的污泥、色氨酸和空白对照),探索污泥对草地早熟禾生长及其激素代谢的影响。研究表明,干旱胁迫下,污泥能显著提高草坪观质量以及叶绿素、类胡萝卜素含量,促进其光合作用($P<0.05$)。干旱胁迫下,污泥和色氨酸均能提高草地早熟禾根系的色氨酸及吲哚乙酸含量;污泥可以显著提高草地早熟禾根系和叶片中的吲哚乙酸及色氨酸含量,且施用添加色氨酸的污泥比单独施用污泥的影响更显著($P<0.05$)。试验表明施用污泥能显著促进草坪草的生长,干旱胁迫下可提高草地早熟禾光合速率;施用污泥也可以增加草地早熟禾叶片、根系中色氨酸及吲哚乙酸的含量。

关键词:污泥;草地早熟禾;生长素;干旱

Effects of biosolids on the growth and auxin metabolism of *Poa pratensis* under drought stress

ZHANG Ning, CAO Yun-xin, XU Wei, CAHNG Zhi-hui*

College of Grassland Science, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Biosolids can improve the physical and chemical properties of soil, and promote plant growth. The aim of this research was to study the effects of biosolids on the growth and auxin metabolism of *Poa pratensis*. A split-plot experiment under the same nitrogen supply level and different water regimes was used, with the main-plot treatments being drought stress and sufficient water supply. The split-plot treatments were biosolids and hormone treatments, namely: indole-3-butyric acid, biosolids, biosolids with added tryptophan, tryptophan and a blank control with no additions. The results showed that biosolids significantly reduced damage to turf quality and ameliorated reductions in chlorophyll and carotenoid content of leaves ($P<0.05$). Under different water conditions, both the biosolids and tryptophan increased the content of tryptophan and indoleacetic acid in the roots, while the biosolids significantly increased indoleacetic acid and tryptophan levels in the root system and leaves, and biosolids mixed with tryptophan was more effective than biosolids alone ($P<0.05$). In summary, the application of biosolids significantly promoted turfgrass growth, increased the chlorophyll and carotenoid content of Kentucky bluegrass leaves under drought stress. Application of biosolids can also increased the content of tryptophan and indoleacetic acid in the leaves and roots, and increased the photosynthetic rate of *P. pratensis* and enhanced its drought resistance.

收稿日期:2020-03-07;改回日期:2020-09-09

基金项目:国家重点研发计划课题—秸秆基料化综合利用技术及标准研究(2018YFF0213502)资助。

作者简介:张宁(1996-),女,山西运城人,在读硕士。E-mail: 18482109297@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: changzh@bjfu.edu.cn

Key words: biosolids; *Poa pratensis*; IAA; drought

污泥是污水处理厂净化处理污水时产生的不包括栅渣、浮渣和沉砂池沙砾的废弃物^[1]。城市污泥中不仅含有植物所需要的氮、磷和钾等养分元素,而且含有可以改良土壤物理结构和生物学特性的大量有机质^[2]。近年来有研究表明污泥中富含生物活性物质(biologically active substances, BAS),已经从污泥中确认并分离出的生物活性物质包括腐殖质、氨基酸、维生素和生长激素等^[3-4]。这些生物活性物质可以调节植物的生长、代谢活动和抵抗非生物胁迫的防御系统^[5-6],其中腐殖质和氨基酸等可以影响植物激素和氮代谢^[7]。色氨酸是生长素的合成前体,在污泥中加入色氨酸可以使其生长素的含量上升,将这种污泥施用于高羊茅(*Festuca elata*)可以显著提高其叶绿素含量、光化学效率以及耐旱性^[5]。此外,也有研究表明生物污泥可以改变植物内源激素的水平并影响抗氧化酶系统从而改善植物的抗旱性^[8]。

植物体内的激素代谢及其相对平衡会根据发育和环境信号不断变化^[9-10]。吲哚-3-乙酸(auxin, IAA)能促进根的发育,细胞分裂素(cytokinin, CTK)可以抗衰老,脱落酸(abscisic acid, ABA)主要调节水分胁迫下气孔的开闭^[10]。IAA/CTK的升高有利于根的发育,且IAA和CTK均能抑制ABA诱导的生理效应。研究表明,喷施相关外源激素可提高草地早熟禾(*Poa pratensis*)的无融合生殖率^[11],将腐殖酸直接喷施在叶表面,能增加叶片激素(如细胞分裂素)的含量,影响植物体内激素平衡^[12]。Zhang等^[5]将加入色氨酸的污泥施入土壤,发现干旱胁迫下污泥处理与叶片直接外施生长素处理都能增加植株叶片的IAA和CTK含量,减少ABA含量,增加根生物量以及推迟叶片萎蔫。将污泥或有机肥料施用于土壤,在胁迫条件下可保持植物激素的内在平衡,能够引起植物明显的生理变化^[12]。

草地早熟禾广泛应用于我国北方绿地、运动场以及庭院草坪的建植,但其易受高温和干旱胁迫的影响,应用受到限制。已有研究表明污泥能促进草坪草生长,但是其对植物和草坪草生长素代谢的影响尚未见报道。本试验用硝酸铵与污泥作为氮源,研究干旱胁迫下污泥对草地早熟禾生长及激素代谢的影响,以期污泥用于草坪生产实践提供新的基础数据和理论依据。

1 材料与方法

1.1 污泥

试验污泥取自北京市某污水处理厂,其理化性质如表1所示。

表1 供试污泥的理化性质

Table 1 Properties of biosolids

含水量	全氮	全磷	全钾	腐殖酸	生长素	色氨酸
Water content	Total nitrogen	Total phosphorus	Total potassium	Humic acid	IAA	Tryptophan
(%)	(N, mg·g ⁻¹)	(P, mg·g ⁻¹)	(K, mg·g ⁻¹)	(%)	(μg·g ⁻¹)	(TPR, μg·g ⁻¹)
84.7	66.6	68.9	13.3	40.0	0.095	1.328

1.2 供试草种

试验所用草种是草地早熟禾,品种为“午夜”,播种量为15 g·m⁻²;基质是煅烧黏土(profile products, Chicago),经800℃高温煅烧,不含任何营养物质。

1.3 污泥中可吸收的有效氮含量的确定

试验中的处理分为施用污泥和不施用污泥两类,施用污泥的处理以污泥作为草地早熟禾的氮源,不施用污泥的处理以硝酸铵溶液作氮源。为保证所有处理能为草地早熟禾提供等量的有效氮素,本试验采用不同梯度浓度的硝酸铵溶液和一定量的污泥来种植草地早熟禾,测定污泥中草地早熟禾可吸收的氮含量。

试验在光照培养箱中进行,日夜温度为24℃/18℃,光照14 h,光强600 μmol·m⁻²·s⁻¹。采用直径16 cm,深

10 cm 的聚乙烯塑料盆,每盆装 0.7 kg 煅烧黏土。试验采用随机区组设计,设 6 个处理:1)对照;2)25 mg·kg⁻¹ 氮素;3)50 mg·kg⁻¹ 氮素;4)75 mg·kg⁻¹ 氮素;5)15 g 未添加色氨酸的污泥(UB);6)15 g 添加 20 μmol·g⁻¹ 色氨酸的污泥(TB)。每个处理 5 次重复。前 4 个处理利用 8 mg·mL⁻¹ 硝酸铵溶液提供氮素,后两个处理利用污泥提供氮素。播种前浇水,使每盆的土壤含水量达到 90% 田间持水量。硝酸铵溶液分别在播种前、播种 15 d、播种 30 d 分 3 次等量加入,污泥在播种前用水调成匀浆加入基质中,混合均匀。

试验持续 8 周。全程保持充足的浇水,所有处理用无氮霍格兰溶液提供除氮素外的其他营养物质。定期修剪以保持草坪草高度为 8~10 cm,将每次修剪所得的草屑收集,烘干保存。试验结束后,将所有地上部分全部收集烘干,与之前收集的样品合并,采用凯氏定氮法^[13]测定各处理草坪草的全氮含量。

利用前 4 个处理的数据做出氮摄入量(Y , mg·pot⁻¹)和氮施用量(X , mg·kg⁻¹)的标准曲线,并得出线性方程: $Y=0.3396X+7.0582$ ($R^2=0.9423$)。通过方程计算出未加色氨酸的污泥的有效氮含量为 2.339 mg·g⁻¹,添加色氨酸的污泥的有效氮含量为 2.577 mg·g⁻¹。若将煅烧黏土的氮含量调整为 75 mg·kg⁻¹,则未加色氨酸的污泥、添加色氨酸的污泥的添加量分别为:19.87 和 18.03 g·kg⁻¹。

1.4 试验设计

试验在北京林业大学气象站温室内进行,日夜温度约为 29 °C/17 °C,光照时间为 13 h,光照强度约 600 μmol·m⁻²·s⁻¹。盆栽,播种前及整个生长期保持充足的浇水。试验所用氮肥是硝酸铵溶液与污泥,除氮素外的营养物质由无氮霍格兰营养液提供。

试验采用裂区设计,主处理为水分条件,包括:1)充分浇水:土壤水分含量保持在 90% 田间持水量;2)干旱处理:不浇水,草坪自然干旱,待土壤水分含量降至 25% 田间持水量时复水,保持 90% 田间持水量一周。副处理共 5 个:1)空白对照(CK);2)2 μmol·L⁻¹ 吲哚丁酸处理(indolebutyric acid, IBA);3)19.87 g·kg⁻¹ 未加色氨酸的污泥处理(UB);4)18.03 g·kg⁻¹ 添加色氨酸的污泥处理(TB);5)360.6 μmol·kg⁻¹ 色氨酸处理(TRP)。每处理 4 个重复。IBA 的施用量为 0.365 mg·pot⁻¹ (相当于 70% 田间持水量时浓度为 2 μmol·L⁻¹ 的 IBA);色氨酸的用量与 TB 处理中的色氨酸含量相等。所有处理的氮施入量均为 75 mg·kg⁻¹。2016 年 4 月 20 日在 25 cm×25 cm 的方形塑料花盆中装入 2.5 kg 煅烧黏土,浇透水静置一段时间后,保持土表与盆沿距离不超过 1 cm。污泥在播种前用水调成匀浆均匀混入基质中,IBA、TRP 配成溶液,播种前均匀混入基质中,硝酸铵溶液分别在播种前、播种后第 15 天、播种后第 30 天分 3 次等量加入。

取样时间分别为:2017 年 7 月 7 日、7 月 14 日、8 月 3 日、8 月 11 日和 8 月 19 日,即干旱处理组土壤水分含量分别为田间持水量的 90%、50%、30%、25% 和 90% (复水一周后)。

1.5 测定指标及方法

坪观质量的判断是根据观察草坪草的总体表现打分,采用 9 分制,1 分代表全部枯萎死亡,6 分代表可接受的最低质量,9 分代表非常健康,拥有理想的颜色、均一度^[14]。利用 Li-6400 光合仪(Lincoln, Nebraska USA)测定草地早熟禾叶片光合速率^[15]。参照赵汝^[16]的方法测定叶绿素和类胡萝卜素含量:用 95% 乙醇浸提,分光光度计测定浸提液在波长为 665、649 和 470 nm 处的吸光度,计算色素含量。采用高效液相色谱法^[17]测定吲哚乙酸和色氨酸含量,提取方式参考嵯来强^[18]的方法。

1.6 数据处理

使用 Microsoft Excel 2007 软件整理原始数据、绘制图表,用 SPSS 20.0 对数据分别进行双因素方差分析和单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫下污泥对草地早熟禾生长的影响

2.1.1 坪观质量 充分浇水条件下,所有处理的草地早熟禾外观均表现良好(表 2),8 月 3 日和 11 日,污泥以及添加色氨酸污泥处理的坪观质量均极显著高于对照($P<0.01$)。干旱处理条件下,各处理的坪观质量随土壤含水量的下降而显著下降,复水一周后坪观质量显著恢复。干旱期间,UB 和 TB 处理的坪观质量始终极显著高于

对照 ($P < 0.05$), TRP 处理的坪观质量在复水后显著高于对照 ($P < 0.05$), 说明添加污泥和色氨酸可以显著减轻干旱对草坪草的胁迫。

表 2 2 种水分条件下污泥对草地早熟禾坪观质量的影响

Table 2 Effects of biosolids on turfgrass quality of *P. pratensis* under two water conditions

水分处理 Moisture	基质处理 Matrixes	日期 Date (月-日 Month-day)				
		07-07	07-14	08-03	08-11	08-19
充分浇水 Sufficient water	CK	7.6bA	7.4abAB	7.1bB	7.1bB	7.8aA
	IBA	7.6bA	7.4abAB	7.4abAB	7.2bB	7.7aA
	UB	7.7bA	7.7aA	7.6**aA	7.5**abA	7.8aA
	TB	7.8abAB	7.8aAB	7.8**aAB	7.6**aB	8.0aA
	TRP	7.6bA	7.6abA	7.5*abA	7.3abA	7.8aA
干旱胁迫 Drought stress	CK	7.5bA	6.8cB	5.5dC	4.3fD	5.8dC
	IBA	7.5bA	6.9bcB	6.0cC	4.8eD	6.5**cBC
	UB	8.2**abA	7.6**abB	6.8**bC	5.9**cD	6.9**bcC
	TB	8.3**aA	7.5**abB	6.6**bC	5.9**cD	7.1**bC
	TRP	7.7bA	7.2bAB	5.9cdC	5.4**dC	6.8**bcB

注: CK: 空白对照; UB: 未加色氨酸的污泥处理; TB: 添加色氨酸的污泥处理; TRP: 色氨酸处理。同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$); 同行不同大写字母表示差异显著 ($P < 0.05$); 同一水分处理下, 每一列中试验组与对照组相比, **代表差异极显著 ($P < 0.01$), *代表差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

Note: CK: Control check; UB: Untreated biosolids; TB: Treated biosolids; TRP: Tryptophan. Different lowercase letters within column or uppercase letters within each row of each data set mean significantly difference at $P < 0.05$ or extremely significant difference ($P < 0.01$); under the same moisture treatment, **represents extremely significant difference ($P < 0.01$) and * represents significant difference ($P < 0.05$) between the trial group in each column and the control group difference. The same below.

2.1.2 类胡萝卜素含量 充分浇水条件下, 两种污泥处理的类胡萝卜素含量始终高于对照, 施用污泥能够提高草地早熟禾叶片类胡萝卜素的含量(表3)。干旱胁迫下, 所有处理的叶片类胡萝卜素含量在干旱处理开始后呈上升趋势, 几乎均在8月3日(土壤水分含量降至30%田间持水量)时达到最高, 8月11日(土壤水分含量降至25%田间持水量)时显著下降 ($P < 0.05$), 除纯污泥处理外, 各处理的类胡萝卜素含量均显著高于对照。田间持水量为50%时, 施用污泥能提高草地早熟禾的叶片类胡萝卜素含量; 田间持水量低于30%时, 激素处理可以显著提高草地早熟禾叶片类胡萝卜素的含量。

表 3 2 种水分条件下污泥对草地早熟禾类胡萝卜素含量的影响

Table 3 Effects of biosolids on leaf carotenoid content of *P. pratensis* under two water conditions ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)

水分处理 Moisture	基质处理 Matrixes	日期 Date (月-日 Month-day)				
		07-07	07-14	08-03	08-11	08-19
充分浇水 Sufficient water	CK	0.325cA	0.331cA	0.352dA	0.343abA	0.242bB
	IBA	0.364cB	0.395cB	0.461**cA	0.383aB	0.217bC
	UB	0.459**bA	0.472**bA	0.428**cA	0.393aA	0.253abB
	TB	0.538**aA	0.410*bcC	0.477**bcB	0.425**aC	0.292abD
	TRP	0.410bcB	0.385cB	0.489**bcA	0.406*aB	0.236bC
干旱胁迫 Drought stress	CK	0.355cB	0.477bA	0.500bcA	0.222bC	0.298abB
	IBA	0.356cCD	0.461bcB	0.579*abA	0.401*ABC	0.293abD
	UB	0.358cB	0.557*aA	0.528bA	0.249bC	0.232*abC
	TB	0.366cB	0.547*aA	0.576*abA	0.379*aB	0.305aB
	TRP	0.354cCD	0.461bcB	0.597**aA	0.409*ABC	0.305aD

2.1.3 叶片叶绿素含量 充分浇水条件下,色氨酸处理的叶绿素没有显著变化,吲哚丁酸处理和两种污泥处理的叶绿素含量在试验期内都表现出先上升后下降的趋势(表 4)。7 月 14 日后,所有处理均能显著提高草地早熟禾叶片叶绿素含量($P<0.05$),且污泥处理对叶绿素含量的影响更显著。干旱胁迫下,随着干旱程度的加重,各处理的叶绿素含量都明显下降,在复水一周后明显恢复。干旱胁迫下,各处理的叶绿素含量均显著高于对照,且两种污泥处理的影响比两种激素处理更显著($P<0.05$)。

表 4 2 种水分条件下污泥对草地早熟禾叶绿素含量的影响

Table 4 Effects of biosolids on leaf chlorophyll content of *P. pratensis* under two water conditions ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)

水分处理 Moisture	基质处理 Matrixes	日期 Date (月-日 Month-day)				
		07-07	07-14	08-03	08-11	08-19
充分浇水 Sufficient water	CK	2.70cA	1.92cB	2.17deB	2.26cAB	2.35bcAB
	IBA	2.61cBC	2.96**bAB	2.51*dC	2.73bcABC	3.06**abA
	UB	3.24bcBC	2.85**bC	4.33**aA	3.66**aAB	3.59**aABC
	TB	3.11bcC	3.20**bC	4.43**aA	4.01**aB	3.20**abC
	TRP	2.89cA	2.90**bA	3.36**bA	2.95**bA	2.90*bA
干旱胁迫 Drought stress	CK	3.51bA	3.02bB	2.10eC	1.39dD	2.23cC
	IBA	3.94abA	3.39abB	2.89**cC	2.12**cD	2.91bC
	UB	4.17aA	3.84**aA	3.09**bcB	2.38**cC	3.35**abB
	TB	4.04aA	3.84**aA	3.21**bcB	2.67**bcC	3.39**abB
	TRP	3.95abA	3.39abAB	2.69*cdBC	2.26**cC	3.28**abAB

2.1.4 光合速率 充分浇水条件下,各处理的光合速率在试验期内均无明显变化(表 5),试验后期,各种激素和污泥处理的光合速率均显著高于对照($P<0.05$),且污泥和色氨酸处理的光合速率均高于吲哚丁酸处理($P<0.05$)。干旱胁迫下,所有处理的光合速率均随着土壤水分含量的下降而降低,在复水一周后回升。与其他处理相比,两种污泥处理能显著提高干旱胁迫下草地早熟禾的光合速率($P<0.05$)。

表 5 2 种水分条件下污泥对草地早熟禾叶片光合速率的影响

Table 5 Effects of biosolids on leaf photosynthetic rate of *P. pratensis* under two water conditions ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

水分处理 Moisture	基质处理 Matrixes	日期 Date (月-日 Month-day)				
		07-07	07-14	08-03	08-11	08-19
充分浇水 Sufficient water	CK	4.36bA	4.42bA	4.21bA	4.08cA	4.11bcA
	IBA	5.24abA	4.90abA	5.02**abA	4.85**bA	4.92abA
	UB	5.26abA	5.15**aA	5.08**abA	5.43**abA	5.44aA
	TB	5.31abA	5.25**aA	5.41**aA	5.79**aA	5.66aA
	TRP	4.79bA	5.09*aA	4.97**abA	5.26**abA	5.55aA
干旱胁迫 Drought stress	CK	4.28bA	3.67cB	2.90cC	2.24eD	3.09cBC
	IBA	5.21*abA	4.35*bB	3.19cC	2.77deC	3.21cC
	UB	5.32*abA	5.22**aA	4.53**bAB	3.81**cdB	4.62bAB
	TB	5.88**aA	5.39**aAB	4.65**bBC	4.00**cC	4.53bBC
	TRP	4.97bA	4.43*bB	3.43cCD	3.15*dD	3.64cC

2.2 干旱胁迫下污泥对草地早熟禾色氨酸含量的影响

2.2.1 根系 充分浇水条件下,各处理的草地早熟禾根系色氨酸含量均随着试验的进行而逐渐下降,色氨酸处理下降最为显著,添加色氨酸的污泥处理的根系色氨酸含量始终极显著高于对照($P<0.01$,表 6)。干旱胁迫

下,各处理的根系色氨酸含量均在8月11日(土壤水分含量降至25%田间持水量)显著升高,所有处理都可以在干旱胁迫中提高草地早熟禾根系TRP的含量,按照影响程度从高到低排列为:TRP>UB、TB>IBA。

2.2.2 叶片 充分浇水条件下,除对照外其他处理的叶片色氨酸含量均在8月3日显著上升,所有处理在8月11日显著下降,在8月19日又显著上升(表7)。各处理的叶片色氨酸含量基本低于对照或对其无显著影响。干旱胁迫下,所有处理的叶片色氨酸含量都在8月3日(土壤水分为30%田间持水量)时达到最高,而后又显著下降。干旱期间,色氨酸处理的叶片色氨酸含量几乎始终高于对照,但复水一周后,与对照无显著差异。

表7 2种水分条件下污泥对草地早熟禾叶片色氨酸含量的影响

Table 7 Effects of biosolids on leaf TRP content of *P. pratensis* under two water conditions ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)

水分处理 Moisture	基质处理 Matrixes	日期 Date (月-日 Month-day)				
		07-07	07-14	08-03	08-11	08-19
充分浇水 Sufficient water	CK	3.641aA	3.926aA	2.465fgB	1.554eC	2.240dB
	IBA	2.109**bcB	1.662**bcC	2.849**fA	1.634deC	2.178dB
	UB	1.644**deC	1.702**bC	2.678fgB	1.047**hD	3.086cA
	TB	2.148**bcB	1.706**bC	2.074**gB	1.236**fD	2.844cdA
	TRP	2.007**cdC	1.167**eD	4.538**eA	1.101**gD	2.844cdB
干旱胁迫 Drought stress	CK	1.920cdC	1.300dC	10.019cA	1.948dC	4.986abB
	IBA	1.523**eD	1.304dD	6.881**dA	3.674**bB	2.519cdC
	UB	1.856dD	1.601**cD	21.569**aA	2.475cC	3.882bB
	TB	2.094**cC	0.875**fD	12.534**bA	1.819deC	5.105aB
	TRP	2.323**bC	1.152**eD	13.251**bA	4.994**aB	4.388bB

2.3 干旱胁迫下污泥对草地早熟禾吲哚乙酸代谢的影响

2.3.1 土壤 充分浇水条件下,所有处理的土壤中吲哚乙酸含量均在试验起始时最高,在此后的试验过程中出现不同程度的下降(表8)。所有处理的土壤IAA含量均高于对照。干旱处理条件下,两种污泥处理和色氨酸处理均能在干旱胁迫中显著提高土壤IAA的含量,复水后无显著影响;相反,吲哚丁酸处理在干旱胁迫中没有显著影响土壤IAA的含量,复水后显著提高了土壤IAA的含量($P<0.05$)。

2.3.2 根系 充分浇水条件下,除纯污泥以外的其他处理的根系IAA含量均呈现出先降低后升高的趋势(表9)。干旱胁迫下,所有处理的根系IAA含量

表6 2种水分条件下污泥对草地早熟禾根系色氨酸含量的影响

Table 6 Effects of biosolids on root TRP content of *P. pratensis* under two water conditions ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)

水分处理 Moisture	基质处理 Matrixes	日期 Date (月-日 Month-day)		
		07-07	08-11	08-19
充分浇水 Sufficient water	CK	2.076bAB	2.191abA	1.592abB
	IBA	2.436abA	2.263abA	0.767**bB
	UB	2.897**abA	2.553**aB	1.336bC
	TB	3.204**abA	2.960**aA	2.447**abB
	TRP	3.684**aA	2.438**abB	1.302bC
干旱胁迫 Drought stress	CK	1.116bC	1.360bB	1.565abA
	IBA	1.783bB	2.515aA	1.505abC
	UB	1.952bB	2.823aA	2.598aA
	TB	2.262abB	2.602aA	2.383abAB
	TRP	2.393abB	2.974aA	2.419abB

表8 2种水分条件下污泥对草地早熟禾土壤IAA含量的影响

Table 8 Effects of biosolids on soil IAA content of *P. pratensis* under two water conditions ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)

水分处理 Moisture	基质处理 Matrixes	日期 Date (月-日 Month-day)		
		07-07	08-11	08-19
充分浇水 Sufficient water	CK	0.645bcA	0.632bA	0.596bB
	IBA	0.697bA	0.668bB	0.686bA
	UB	0.704bA	0.648bB	0.625bC
	TB	0.716bA	0.637bC	0.663bB
	TRP	0.727bA	0.673bB	0.667bB
干旱胁迫 Drought stress	CK	0.561cC	0.668bA	0.635bB
	IBA	0.631bcB	0.668bB	0.810**aA
	UB	0.709**bAB	0.748**abA	0.677bB
	TB	0.974**aA	0.753**aB	0.672bB
	TRP	0.645*bcB	0.711**abA	0.648bB

随干旱加重而显著下降($P<0.05$),复水后,除对照含量再次下降外,其他处理均回升($P<0.05$)。IBA、UB、TB 和 TRP 处理都能提高草地早熟禾根系 IAA 含量,UB 和 TB 的影响比 IBA 和 TRP 的影响更显著。

2.3.3 叶片 充分浇水条件下,对照的叶片 IAA 含量在 7 月 14 日有所升高,此后基本无显著变化。IBA、UB、TB 和 TRP 处理并未稳定地表现出能提高草地早熟禾叶片 IAA 含量的作用。干旱胁迫下,从干旱处理开始至土壤水分含量降至 30% 田间持水量时,各处理的叶片 IAA 含量呈上升趋势,土壤水分含量降至 25% 田间持水量时,除纯污泥处理变化不显著外其他处理均显著下降。复水一周后,仅对照的叶片 IAA 含量显著回升($P<0.05$),UB 处理的显著下降($P<0.05$)。TB 处理在轻度至中度干旱时可以显著提高叶片 IAA 含量,IBA 和 TRP 在干旱处理开始前均显著高于对照,但随着土壤水分含量的降低,其含量逐渐低于对照(表 10)。

表 9 2 种水分条件下污泥对草地早熟禾根系 IAA 含量的影响
Table 9 Effects of biosolids on root IAA content of *P. pratensis* under two water conditions ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)

水分处理 Moisture	基质处理 Matrixes	日期 Date (月-日 Month-day)		
		07-07	08-11	08-19
充分浇水 Sufficient water	CK	1.330aB	1.245aB	1.620abA
	IBA	1.834aA	1.151aC	1.436abB
	UB	1.730aA	1.295aB	1.167 [*] bC
	TB	1.595aA	1.301aB	1.659aA
干旱胁迫 Drought stress	TRP	1.495aA	1.293aB	1.466abA
	CK	1.287aA	1.257aB	1.069bC
	IBA	1.589aA	1.311aB	1.477abA
	UB	1.611aA	1.307aB	1.686aA
	TB	1.657aB	1.487aC	1.756 [*] aA
	TRP	1.609aA	1.337aB	1.590abA

表 10 2 种水分条件下污泥对草地早熟禾叶片 IAA 含量的影响

Table 10 Effects of biosolids on leaf IAA content of *P. pratensis* under two water conditions ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)

水分处理 Moisture	基质处理 Matrixes	日期 Date (月-日 Month-day)				
		07-07	07-14	08-03	08-11	08-19
充分浇水 Sufficient water	CK	1.384dC	1.808cA	1.683cdAB	1.772aA	1.594cB
	IBA	1.432cdC	1.512 ^{**} deC	1.957 ^{**} bcA	1.101 ^{**} cD	1.759bB
	UB	1.270deD	1.568 ^{**} dB	1.598cdB	1.445 ^{**} bC	1.829bA
	TB	1.994 ^{**} aA	1.317 ^{**} eC	1.594cdB	1.501 ^{**} abB	1.549cdB
	TRP	1.757 ^{**} bA	1.803cA	1.349 ^{**} dD	1.607 [*] abB	1.481dC
干旱胁迫 Drought stress	CK	1.154eD	1.854cB	2.306bA	1.592bC	2.280aA
	IBA	1.328deB	1.571 ^{**} dA	1.636 [*] cdA	1.324 ^{**} cB	1.414dAB
	UB	1.407 [*] dC	1.390 ^{**} eC	1.833cA	1.754 ^{**} aA	1.606cB
	TB	1.483 ^{**} cdC	2.367 ^{**} aB	3.614 ^{**} aA	1.414 ^{**} cC	1.624cC
	TRP	1.581 ^{**} cB	2.002bA	2.017bcA	1.406 ^{**} cB	1.601cB

3 讨论与结论

3.1 干旱胁迫下污泥能显著促进草地早熟禾的生长,增强其光合作用

本研究表明充分浇水条件下,两种污泥处理显著提高了其坪观质量;干旱胁迫下,UB、TB 和 TRP 处理可以减少坪观质量的下降,施用污泥对改善草地早熟禾的坪观质量有更显著的影响。草坪草的坪观质量涵盖了草坪的颜色、密度、均一度、质地等^[19],是综合性的评价指标。根据已有的研究表明,施用污泥能够提高高羊茅的坪观质和叶绿素含量^[20]。此外,污泥能加快干旱胁迫复水后坪观质量的恢复速率,在干旱胁迫下,污泥与无机肥料混合施用比单独施用污泥更有利于减缓干旱对坪观质量造成的损伤^[18]。

UB 和 TB 处理在水分充足或是干旱胁迫下均可提高草地早熟禾的光合速率,IBA 和 TRP 处理在干旱胁迫下可以提高其光合速率,Zhang 等^[5]的研究表明污泥能够提高高羊茅的光合速率,本试验研究结果与其一致。

沈志平等^[21]的研究表明风干污泥淋洗液能够显著提高黑麦草(*Lolium perenne*)叶绿素含量,赵晓莉等^[22]的研

究发现黑麦草的叶绿素含量在污泥施用量为 $25\sim 30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的情况下达到极大值。本试验中,在两种水分条件下,4种处理对草地早熟禾叶片叶绿素含量有显著提高的效果,且污泥处理的表现优于激素处理。叶绿素含量在一定程度上能反映植物的光合作用能力,其会在草坪草遭受干旱胁迫时下降,是因为叶片失水减少了叶绿素的合成并加速了已合成叶绿素的分解^[23],本试验中,各处理的叶绿素含量随着干旱程度的加深而逐渐下降,复水后得到回升,与上述理论一致。

类胡萝卜素能将吸收的光能传递给叶绿素 a,而且能够保护叶绿素,有研究表明干旱胁迫会导致类胡萝卜素含量的下降^[24],在本试验中,草地早熟禾的类胡萝卜素在干旱胁迫下先呈上升的趋势,而后在干旱最严重时下降。范敏等^[25]在研究中发现干旱胁迫下,马铃薯(*Solanum tuberosum*)的 β -胡萝卜素羟化酶 1 基因的表达增加,这种酶是类胡萝卜素合成途径中一个重要的酶,即干旱胁迫下马铃薯中的类胡萝卜素的合成是增加的,上述研究推测这是由于干旱胁迫导致细胞中产生过多的活性氧和自由基,细胞需要合成较多的类胡萝卜素来消除活性氧对细胞的危害。所以推测本试验中干旱胁迫前期类胡萝卜素含量的增加也可能是出于同样的原因,而在干旱胁迫严重时,细胞膜可能受损严重,无法合成更多的类胡萝卜素而导致其含量显著下降。

本试验研究表明添加污泥的处理能显著促进草地早熟禾的生长,其带来的益处是单独施用某一激素或营养物质所无法代替的。

3.2 干旱胁迫下污泥对草地早熟禾生长素代谢的影响

3.2.1 干旱胁迫下污泥能提高草地早熟禾根系和叶片色氨酸含量 色氨酸是植物体内吲哚乙酸(IAA)生物合成的主要前体^[26],合成途径至少有 5 种,绝大多数植物合成吲哚乙酸的途径都相似,只是有些中间产物不一样^[27-29]。在本试验中,充分浇水条件下,TB 处理提高其根系色氨酸含量作用最佳,干旱胁迫下,TRP 和 UB 处理能提高草地早熟禾叶片色氨酸含量,污泥和激素处理都能提高根系色氨酸含量。

色氨酸不是单纯作为一种营养物质去发挥其营养效应,而是由于该物质很容易转变成 IAA^[30]。根系和叶片都是植物合成 IAA 的部位,TB 处理在充分浇水条件下对根系 TRP 和 IAA 含量都可以大幅提高,说明 TB 能增加 IAA 在根系中的合成。喷施色氨酸调控植物的生长发育是通过色氨酸影响植物体内的激素平衡和促进营养物质如 N、P 和 K 等吸收的结果^[31]。所以,干旱胁迫下污泥提高草地早熟禾根系和叶片的色氨酸含量,可以进一步促进其体内的激素平衡和营养吸收,从而增强草地早熟禾的耐旱性。这与韩朝等^[20]施用污泥能够促进干旱条件下高羊茅的氮素利用的结论一致,也与于安东等^[32]施用生物污泥可以增强草地早熟禾耐旱性的结论相同。

3.2.2 干旱胁迫下污泥能提高草地早熟禾土壤、根系和叶片 IAA 含量 生长素在一定的浓度范围内,起着促进植物维管系统的分化、调节植物“源-库”关系的作用^[33]。在本试验中,污泥和色氨酸处理在水分充足和干旱胁迫条件下均能提高草地早熟禾根系和土壤中的吲哚乙酸含量,添加色氨酸的污泥对根系吲哚乙酸含量的影响最显著。

有研究表明污泥能够提高草坪草叶片 IAA 含量^[5],但在本试验中 UB 和 TB 在充分浇水条件下没有显著提高草地早熟禾叶片 IAA 含量。嵇来强^[18]在研究污泥对草地早熟禾氮代谢和根系生长的影响时发现,充分浇水条件下半污泥处理能够提高草地早熟禾叶片 IAA 含量,但全污泥处理的叶片 IAA 含量没有高于对照甚至有时会低于对照,并推测可能是污泥中的重金属导致草坪草叶片中的重金属离子含量升高而影响了生长素的代谢平衡,所以本试验的结果表明可能是 IAA 在草坪草体内的运输受到处理的干扰,导致其在根部积累而在叶片中减少。

根据嵇来强^[18]的研究,干旱胁迫下,全污泥和半污泥处理都能提高草地早熟禾叶片 IAA 含量,且全污泥的促进作用更显著,并推测干旱条件下,生物活性物质的含量对叶片 IAA 含量的影响较大,所以含有更多生物活性物质的全污泥处理表现出明显的优势,本试验结果与此一致,本试验中,干旱胁迫下,TB 处理可以提高草地早熟禾叶片 IAA 的含量。嵇来强^[18]的研究还表明,污泥能在充分浇水条件下提高草地早熟禾根系生长素含量,本试验结果也与此一致。在本试验中,TB 处理可提高土壤 IAA 含量可能是因为污泥中 IAA 以及微生物合成 IAA 直接增加了其含量。

综上,施用污泥能够提高草地早熟禾根系和土壤中的吲哚乙酸含量,提高叶片和根系的色氨酸含量,从而促

进草地早熟禾的生长,并且能在干旱胁迫下使草地早熟禾维持较高的生长势和较高的激素水平,减轻干旱胁迫对其生长素代谢的影响。

参考文献 References:

- [1] Institute of Standards and Quotas, Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Guidelines for the implementation of sludge disposal standards in urban sewage treatment plants. Beijing: China Standards Press, 2011: 2.
住房和城乡建设部标准定额研究所. 城镇污水处理厂污泥处置系列标准实施指南. 北京: 中国标准出版社, 2011: 2.
- [2] Cui C H. Application of products derived from sewage sludge to farm land and evaluation of their organic matter quality. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008.
崔春红. 污泥农肥化施用效果及肥料中有机质质量的评价研究. 南京: 南京农业大学, 2008.
- [3] Lemmer H, Nitschke L. Vitamin content of four sludge fractions in the activated sludge wastewater treatment process. Water Research, 1994, 28(3): 737—739.
- [4] Sanchez-Monedero M A, Roig A, Cegarra J, *et al.* Relationships between water-soluble carbohydrate and phenol fractions and the humification indices of different organic wastes during composting. Bioresource Technology, 1999, 70: 193—201.
- [5] Zhang X Z, Ervin E H, Evanylo G K. Impact of biosolids on hormone metabolism in drought-stressed tall fescue. Crop Science, 2009, 49: 1893—1901.
- [6] Zhang X Z, Schmidt R E. Antioxidant responses to hormone-containing product in Kentucky bluegrass subject to drought. Crop Science, 1999, 39: 545—551.
- [7] Higgins M J, Adams G, Chen Y, *et al.* Role of protein, amino acids, and enzyme activity on odor production from anaerobically digested and dewatered biosolids. Water Environment Research, 2008, 80: 127—135.
- [8] Yu F F. Effect of biosolids on Kentucky bluegrass (*Poa pratensis* L.) drought stress. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.
于芳芳. 生物污泥对草地早熟禾抗旱性影响研究. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [9] Bettina T. Plant responses to environmental stresses: From phytohormones to genome reorganization. Phytochemistry, 2001, 56(6): 641—642.
- [10] Strivastava L M. Plant growth and development: Hormones and environment. San Diego: Academic Press, 2002.
- [11] Liu Y, Yu M L, Zhang R, *et al.* The relationship between endogenous hormone content and apomixis rate of wild Kentucky bluegrass in Gansu Province. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(7): 99—111.
刘燕, 于美玲, 张然, 等. 甘肃野生草地早熟禾内源激素含量的变化与无融合生殖率的关系研究. 草业学报, 2020, 29(7): 99—111.
- [12] Zhang X, Ervin E H. Cytokinin-containing seaweed and humic acid extracts associated with creeping bentgrass leaf cytokinins and drought resistance. Crop Science, 2004, 44: 1737—1745.
- [13] Fan Z Y, Liu Q S, Zhang P. Comparison of the kjeldahl method and the dumas method for total nitrogen determination in grasses. Modern Scientific Instruments, 2007(1): 46—47.
范志影, 刘庆生, 张萍. 用凯氏法和杜马斯法测定植物样品中的全氮. 现代科学仪器, 2007(1): 46—47.
- [14] Cao Y X, Yu F F, Bai M, *et al.* Impact of sewage sludge and indole butyric acid on growth and drought tolerance of *Poa pratensis* under drought stress. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(5): 109—119.
曹允馨, 于芳芳, 白梅, 等. 污泥和吲哚丁酸对草地早熟禾的生长和耐旱性的影响研究. 草业学报, 2018, 27(5): 109—119.
- [15] Li X Y. Noticeable problems in photosynthetic characteristics research by Li-6400. Forestry Science and Technology, 2018, 43(2): 57—59.
李晓宇. 使用 Li-6400 进行光合特性研究应注意的问题. 林业科技, 2018, 43(2): 57—59.
- [16] Zhao R. Research on the resistance of tall fescue with foreign *DREB1A* gene and their filial generation. Beijing: Beijing Forestry University, 2010.
赵汝. 转 *DREB1A* 基因高羊茅及其子代的抗性研究. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [17] Edlund A, Eklof S, Sundberg B, *et al.* A microscale technique for gas chromatography-mass spectrometry measurements of picogram amounts of indole-3-acetic acid in plant tissues. Plant Physiology, 1995, 108(3): 1043—1047.
- [18] Zhuo L Q. Biosolids impact on nitrogen metabolism and root growth of Kentucky bluegrass (*Poa pratensis* L.). Beijing: Beijing Forestry University, 2013.

- 嵯来强. 污泥对草地早熟禾氮代谢和根系生长的影响. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [19] Qi F. Study on the effects of traffic stress on the tillering and physiological regulation of tall fescue (*Festuca arundinacea*) and Kentucky bluegrass (*Poa pratensis* L.). Beijing: Beijing Forestry University, 2012.
- 奇凤. 践踏处理对高羊茅(*Festuca arundinacea*)和草地早熟禾(*Poa pratensis* L.)分蘖生长影响及生理调控研究. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [20] Han C, Liu Y, Dong H, *et al.* Influences of biosolids on drought resistance of tall fescue. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(3): 127–135.
- 韩朝, 刘洋, 董慧, 等. 污泥对高羊茅抗旱性的影响研究. *草业学报*, 2014, 23(3): 127–135.
- [21] Shen Z P, Duo L A, Zhao S L. Effects of air dried sewage sludge leachate after remediation on initial growth and heavy metal accumulation of *lolium perenne*. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5): 937–943.
- 沈志平, 多立安, 赵树兰. 风干污泥修复后淋洗液对黑麦草初期生长与重金属富集的影响. *农业环境科学学报*, 2013, 32(5): 937–943.
- [22] Zhao X L, Xu D F, Li Z H, *et al.* Influence of municipal sludge land application to ryegrass physical and chemical properties and quality. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(Supple 1): 59–63.
- 赵晓莉, 徐德福, 李泽宏, 等. 城市污泥的土地利用对黑麦草理化指标和品质的影响. *农业环境科学学报*, 2010, 29(增刊 1): 59–63.
- [23] Hu M Y, Li H, Zhang Y J, *et al.* Photosynthesis and related physiological characteristics affected by exogenous glucose in wheat seedlings under water stress. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(4): 724–732.
- 胡梦芸, 李辉, 张颖君, 等. 水分胁迫下葡萄糖对小麦幼苗光合作用和相关生理特性的影响. *作物学报*, 2009, 35(4): 724–732.
- [24] Tong F P, Fang W, Ma L Y, *et al.* Study on response of the contents of photosynthetic pigments of slash pine's half-sib under water stress. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(11): 97–102.
- 童方平, 方伟, 马履一, 等. 水分胁迫下湿地松优良半同胞家系光合色素的响应. *中国农学通报*, 2006, 22(11): 97–102.
- [25] Fan M, Jin L P, Huang S W, *et al.* Effects of drought on gene expressions of key enzymes in carotenoid and flavonoid biosynthesis in potato. *Acta Horticulturae Sinica*, 2008, 35(4): 535–542.
- 范敏, 金黎平, 黄三文, 等. 干旱胁迫对马铃薯类黄酮和类胡萝卜素合成关键酶基因表达的影响. *园艺学报*, 2008, 35(4): 535–542.
- [26] Schilling C H, Letscher D, Palsson B. Theory for the systemic definition of metabolic pathways and their use in interpreting metabolic function from a pathway-oriented perspective. *Journal of Theoretical Biology*, 2000, 203(3): 229–248.
- [27] Patten C, Glick B. Bacterial biosynthesis of indole-3-acetic acid. *Canadian Journal of Microbiology*, 1996, 42: 207–220.
- [28] Spaepen S, Vanderleyden J, Remans R. Indole-3-acetic acid in microbial and microorganism-plant signaling. *FEMS Microbiology Reviews*, 2007, 31: 425–448.
- [29] Woodward A, Bartel B. Auxin: Regulation, action, and interaction. *Annales Botanici Fennici*, 2005, 95: 707–735.
- [30] Zhong X H. Studies on the regulation mechanism of tryptophan on tissue culture and growth in strawberry. Changsha: Hunan Agricultural University, 2004.
- 钟晓红. 色氨酸对草莓离体培养与生长发育的调控机理研究. 长沙: 湖南农业大学, 2004.
- [31] Chen Z D, Huang J J, He J M, *et al.* Influence of L-tryptophan applied to soil on yield and nutrient uptake of cabbage. *Acta Pedologica Sinica*, 1997(2): 200–205.
- 陈振德, 黄俊杰, 何金明, 等. 土施L-色氨酸对甘蓝产量和养分吸收的影响. *土壤学报*, 1997(2): 200–205.
- [32] Yu A D, Yu F F, Teng K, *et al.* Effect of biosolids on drought resistance and cell antioxidant capacity of *Poa pratensis*. *Pratacultural Science*, 2018, 35(8): 1870–1878.
- 于安东, 于芳芳, 滕珂, 等. 生物污泥对草地早熟禾耐旱及细胞抗氧化能力的影响. *草业科学*, 2018, 35(8): 1870–1878.
- [33] Xu Z H. Polar transport of auxin and its role in plant development regulation. *Chinese Bulletin of Life Science*, 1998(2): 52–54.
- 许智宏. 生长素的极性运输及其在植物发育调控中的作用. *生命科学*, 1998(2): 52–54.