

不同盐分土壤环境下绿肥腐解及养分释放动态研究

朱小梅¹, 王建红², 赵宝泉¹, 温祝桂¹, 董静¹, 邢锦城¹, 刘冲¹, 洪立洲¹

(1. 江苏沿海地区农业科学研究所, 江苏 盐城 224002; 2. 浙江省农业科学院, 杭州 310021)

摘要: 通过尼龙网袋埋田法研究了绿肥苕子、黑麦草在不同盐分滨海盐渍土壤中的腐解及养分释放规律。结果表明, 不同盐分地块黑麦草干物质残留率、总有机碳含量和 C/N 总体高于苕子。苕子氮、钾在最初 15 天内快速释放, 不同盐分地块的残留率分别为 20.4%~34.0% 和 13.2%~18.1%, 黑麦草钾在前 45 天释放了近 90%, 氮、磷释放持续整个腐解过程。低盐分地块绿肥钠的最终残留率为 5.2%~7.6%, 高盐分地块为 36.2%~49.2%。不同盐分地块绿肥镁、钙、锌残留率以黑麦草高于苕子。铜的释放主要集中于前 45 天, 之后趋于停滞。镁、铁、锰分别在腐解 45~60 天或 45~75 天出现养分富集现象。整体来看, 禾本科绿肥干物质及养分残留率均高于豆科绿肥, 高盐分明显阻滞了绿肥氮、钙、镁、铁、锰、铜和锌养分的释放。

关键词: 盐分; 绿肥; 养分释放

中图分类号: S142; S158.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)06-0309-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.06.044

Dynamics of Decomposition and Nutrient Release of Green Manure Under Different Saline Soils

ZHU Xiaomei¹, WANG Jianhong², ZHAO Baoquan¹, WEN Zhugui¹,

DONG Jing¹, XING Jingcheng¹, LIU Chong¹, HONG Lizhou¹

(1. Institute of Agriculture Sciences in the Coastal Area Jiangsu, Yancheng,

Jiangsu 224002; 2. Zhejiang Academy of Agriculture Sciences, Hangzhou 310021)

Abstract: A nylon net bag embedding method was carried out to study the decomposition and nutrient release of green manure *Viciavillosa* and ryegrass in coastal saline soil with different salinity. The results showed that the dry matter residue rate, total organic carbon content and C/N ratio of ryegrass in different salt plots were higher than those of *V. villosa*. The nitrogen and potassium of *V. villosa* were released rapidly in the first 15 days, and the residual rates in different salinity plots were 20.4%~34.0% and 13.2%~18.1% respectively. The potassium of ryegrass was released by nearly 90% in the initial 45 days, and the releasing of nitrogen and phosphorus continued in the whole decomposition process. The final residual rate of sodium in green manure in low salinity plots was 5.2%~7.6%, and in high salinity plots was 36.2%~49.2%. The residual rates of magnesium, calcium and zinc in ryegrass in different salinity plots were higher than those in *V. villosa*. The release of copper was mainly in the initial 45 days, and then tended to stagnate. The nutrient enrichment of magnesium, iron and manganese appeared in decomposed 45 to 60 or 45 to 75 days respectively. In general, the residue rate of dry matter and nutrient in gramineous green manure was higher than that of leguminous green manure. High salinity obviously blocked the release of nitrogen, calcium, magnesium, iron, manganese, copper, zinc and other nutrients in green manure.

Keywords: salt; green manure; nutrient release

绿肥是直接或异地翻压、或经堆沤后施用到土壤中作肥料的全部或部分绿色体的统称。绿肥还田是维持土壤有机质含量、提高土壤微生物活性、改善土壤理化性质和增加土壤养分有效性的有效方式。因此, 在农业生产实践中, 将不同类型的绿肥或作物残

体还田在世界范围内愈来愈受到重视, 并被广泛采用^[1]。我国现有滩涂面积 350 多万 hm^2 , 而江苏沿海滩涂面积约 68.7 万 hm^2 , 且每年仍以 0.13 万 hm^2 的速度向东淤进, 这一广袤的滩涂资源是我国东部地区最具潜力、最有价值的土地后备资源。但由于其地

收稿日期: 2018-06-04

资助项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(17)1001); 国家绿肥产业技术体系项目(CARS-22-G-15); 农业部沿海盐碱地科学观测实验站开放课题项目(YHS201607)

第一作者: 朱小梅(1982—)女, 硕士, 副研究员, 主要从事植物营养与盐土改良利用研究。E-mail: xiaomeizhu301@163.com

通信作者: 洪立洲(1968—)男, 硕士, 研究员, 主要从事土壤肥料与盐土农业工程技术研究。E-mail: ychonglz@163.com

下水位较高,土壤返盐严重,且有机质缺乏,一般作物难以生长^[2-3]。因此,通过种植绿肥,特别是田菁、黑麦草、苕子、沙打旺等耐盐绿肥来改良培肥滩涂生地土壤是当前合理开发利用滩涂生地资源的重要措施之一,而明确绿肥的腐解矿化过程是合理利用绿肥的基础。目前,关于绿肥在土壤中的转化和养分释放规律、绿肥腐解的影响因子、绿肥对土壤的改良调节机理、培肥效应等方面,专家已做了较多相关的研究^[4-8]。然而,对不同盐分滩涂生地土壤中豆科与非豆科绿肥还田后养分矿化速率和释放规律的研究还相对较少。因此,本文通过田间埋袋法研究了不同盐分土壤环境下豆科和非豆科绿肥的腐解及碳、氮、磷、钾等养分的释放特征,了解其在滩涂生地土壤中的腐解动态规律,以为沿海滩涂绿肥的合理利用和生地土壤养分科学管理提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2017 年 4—7 月在江苏省盐城市滩涂农

表 1 试验地土壤基本性状

试验地	pH	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	有效钾/ (mg·kg ⁻¹)	盐离子总量/ (g·kg ⁻¹)
高盐(H)	7.83	4.16	0.249	41.5	10.9	276.9	6.76
低盐(L)	7.78	11.50	0.632	77.1	16.4	129.5	1.92

1.3 样品采集与分析方法

从 2017 年 5 月 10 日开始取样,7 月 25 日最后一次取样,共设 6 个取样时间(埋设后 15,30,45,60,75,90 天)。样品水分含量和干物质质量采用烘干法测定;有机碳含量采用重铬酸钾外加热法进行测定;样品经 H₂SO₄—H₂O₂ 消煮后,采用凯氏定氮法测定全氮含量,钒钼黄比色法测定全磷含量;K、Na、Ca、Mg、Fe、Mn、Cu、Zn 采用干灰化—原子吸收分光光度法测定^[9]。土壤基本理化性状采用常规方法测定。

养分残留率 $R = (C_t \times M_t) / (C_0 \times M_0) \times 100\%$

式中: C_t 为 t 时刻绿肥养分浓度(g/kg); M_t 为 t 时刻绿肥干物质质量(kg); C_0 为初始养分浓度(g/kg); M_0

表 2 绿肥地上部初始养分含量

绿肥	TOC/ (g·kg ⁻¹)	N/ (g·kg ⁻¹)	P/ (g·kg ⁻¹)	K/ (g·kg ⁻¹)	Na/ (g·kg ⁻¹)	Ca/ (g·kg ⁻¹)	Mg/ (g·kg ⁻¹)	Fe/ (mg·kg ⁻¹)	Mn/ (mg·kg ⁻¹)	Cu/ (mg·kg ⁻¹)	Zn/ (mg·kg ⁻¹)
黑麦草	428.3	10.6	3.18	24.8	9.42	14.6	2.39	845.6	79.0	6.04	11.9
苕子	399.2	36.6	4.41	45.5	9.10	31.5	3.22	953.2	130.9	13.70	29.0

注: TOC 为总有机碳。

2.2 绿肥的腐解

随着腐解时间的延长,绿肥水分含量呈起伏下降的趋势(图 1),总体以低盐分地块的绿肥水分含量较高,主要原因可能是低盐分地块的土壤水稳性团聚体

业示范基地金海农场(33°00′14″N,120°51′46″E)进行。该区地处暖温带,属于具有季风特点的海洋性气候,年均气温 13~16℃,无霜期 208~220 d,年日照时间 2 100~2 600 h,年均降水量 900~1 300 mm,有明显的梅雨特征。

1.2 试验设计与方法

选取高(H)、低(L)2种不同含盐量的滩涂盐土地块为试验用地(表 1)。采用尼龙网袋埋田法研究黑麦草、苕子 2 个绿肥品种地上部腐解及养分释放规律。2017 年 4 月 25 日,在黑麦草抽穗初期、苕子初花期分别收获其地上部分,剪成 2~3 cm 的小段,充分混匀后分别称取 50 g 样品,装入 20 cm×15 cm、300 目的尼龙网袋中。在 H、L 地块分别埋入装有黑麦草和苕子的尼龙网袋,埋设深度 10 cm,埋设间隔 20 cm。随机取样,按每次取 3 个重复、取样 6 次计算,2 个地块每个绿肥品种分别埋设 18 个尼龙网袋,共 72 袋。同时,称取黑麦草、苕子地上部分鲜样测定水分、全碳及养分含量。

为初始干物质质量(kg)^[10]。

试验数据采用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 绿肥的养分含量

除总有机碳和钠离子外,苕子的氮磷钾养分及中微量元素含量均显著高于黑麦草(表 2)。其中,苕子氮、钾、钙、锰、铜、锌的含量均为黑麦草的近 2 倍或更多,其 C/N 为 10.9,有利于微生物的矿化;而黑麦草的 C/N 为 40.4,较吕丽霞等^[11]的测定结果偏大,这可能与黑麦草成熟度及样品均匀度有一定关系。

含量较高,田间持水量大,使绿肥吸持的水分也较高,而高盐分地块由于较低的土壤有机物质含量和蓄水能力,绿肥吸持的水分含量也随之降低。不同盐分地块苕子的含水量均低于黑麦草。

就干物质残留率而言,高盐分和低盐分地块绿肥腐解速率总体在前 30 天最快,腐解率达 42.8%~59.0%,之后腐解速率趋于平缓,黑麦草干物质残留率总体高于苕子,这可能与黑麦草本身 C/N 较宽不利于微生物分解有关。绿肥有机碳残留率变化规律与干物质残留率基本一致,90 天时黑麦草有机碳残

留率分别为 23.3%和 30.0%,是苕子的 1.5 倍以上。

不同时期,同一种绿肥在高盐分地块的 C/N 均高于低盐分地块,同一地块黑麦草 C/N 整体大于苕子。黑麦草与苕子 C/N 均呈升高—降低—升高的变化趋势,这与绿肥有机碳、氮在不同时期的腐解速率密切相关。

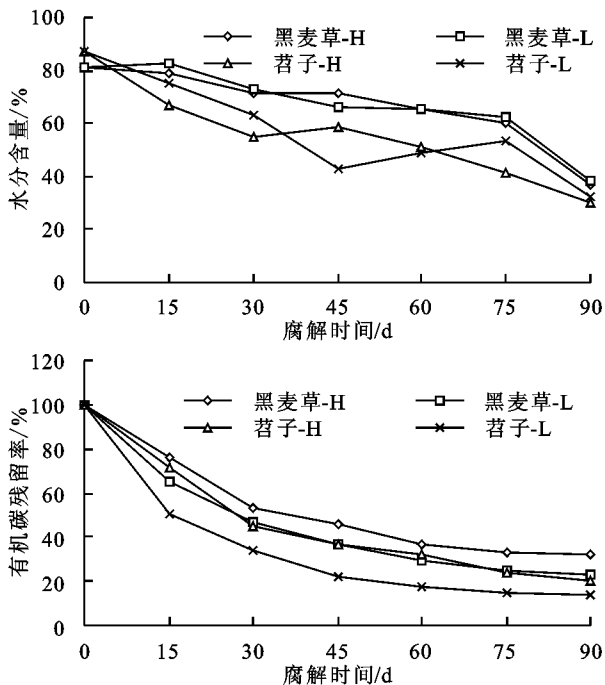


图 1 绿肥水分含量、干物质和有机碳残留率及 C/N 变化

2.3 绿肥氮、磷养分残留率的变化

前 15 天为苕子氮快速释放期,高盐分和低盐分地块中氮残留率分别为 34.0%和 20.4%,15 天后释放速度趋于平缓,且残留率均以高盐分地块 > 低盐分地块(图 2)。

黑麦草氮残留率在整个腐解过程中呈逐渐降低的

趋势,同时期残留率比同地块苕子高 20.4%~53.9%,但同一种绿肥在不同盐分地块的氮残留率相差不显著。苕子、黑麦草磷残留率在前 75 天呈缓慢下降趋势,75 天后磷的释放基本停滞,残留率为 9.40%~14.6%,且总体以黑麦草磷残留率高于苕子,高盐分地块磷残留率也高。

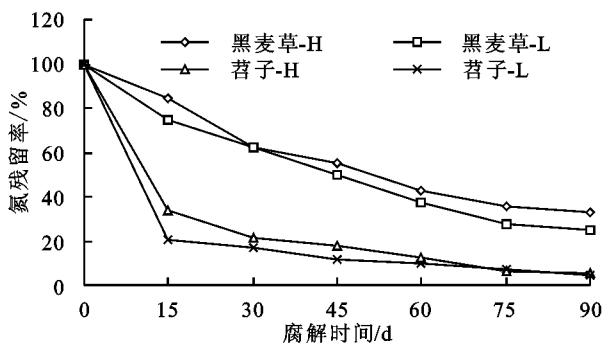
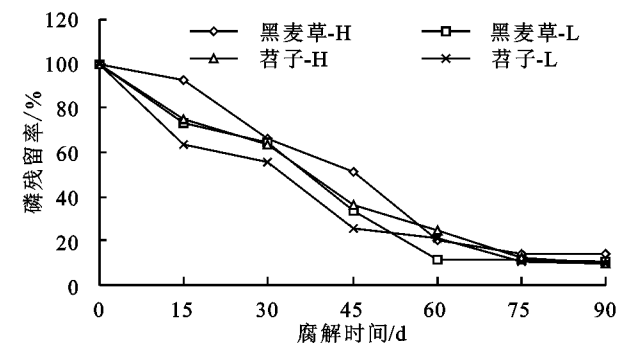


图 2 绿肥氮、磷残留率变化

2.4 绿肥钾、钠、钙、镁残留率的变化

有研究^[9]表明,钾、钠、钙、镁是滨海盐渍土壤中主要阳离子成分,其含量高低对种子发芽、作物生长均有着重要影响。前 15 天为苕子钾快速释放期,高盐分和低盐分土壤中钾残留率分别为 18.1%和 13.2%,15~45 天为其中速释放期,45 天后进入缓慢释放期(图 3)。



黑麦草钾在前 45 天呈持续快速释放状态,第 45 天钾残留率仅 10%左右,且均以高盐分地块为高,之后释放速率趋于平缓。低盐分地块苕子、黑麦草在腐解前 30 天和 45 天钠呈快速释放状态,累积释放率分别为 83.5%和 86.1%,而高盐分地块苕子、黑麦草中的钠则呈缓慢释放状态,90 天时钠残留率分别为 36.2%和 49.2%。

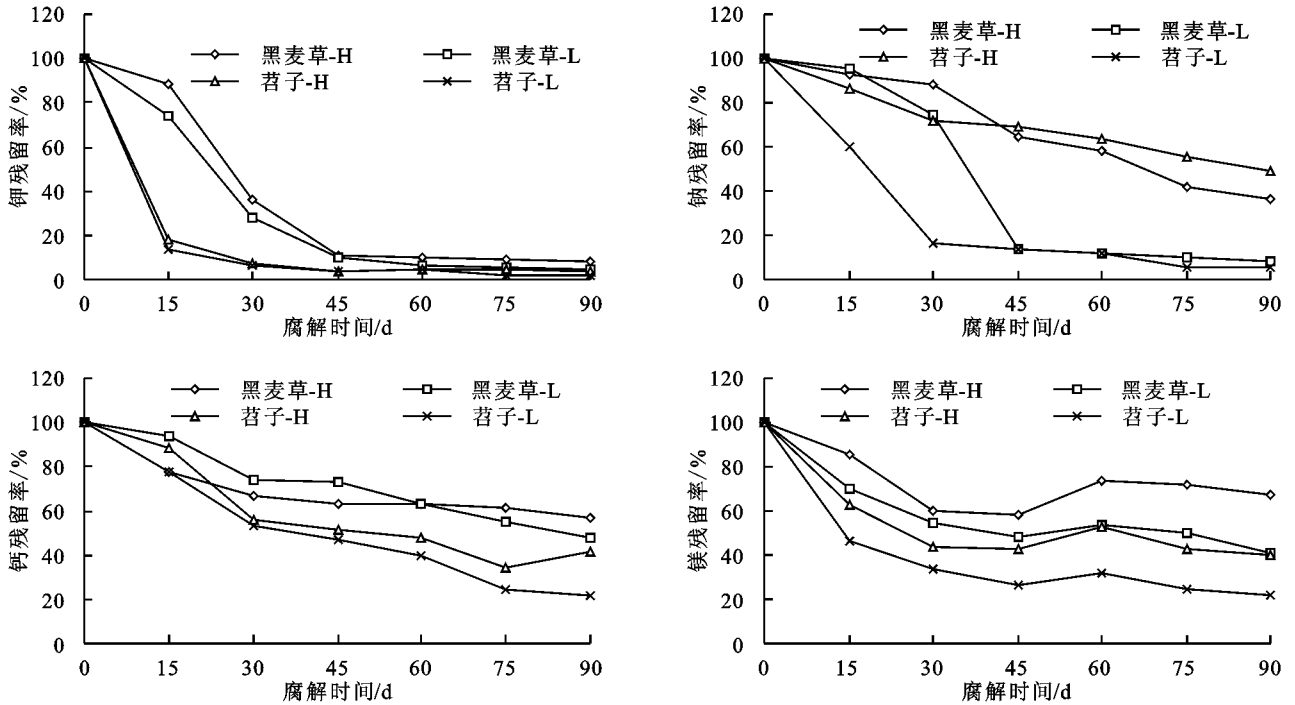


图 3 绿肥钾、钠、钙、镁残留率变化

不同地块绿肥腐解 90 天后, 钙残留率为 21.4%~56.4%, 其中以低盐分地块苕子钙残留率最低。低盐分地块黑麦草钙残留率在前 60 天均高于高盐分地块, 这可能是前期滩涂改良过程中曾施入含钙的土壤改良剂, 而黑麦草腐解初期产生的有机酸使网袋周围的难溶性钙活化, 并被绿肥残体吸附累积造成。不同盐分地块黑麦草钙残留率均高于苕子, 且高盐分地块苕子钙残留率也高。不同盐分地块绿肥镁的残留率均呈明

显的降低—升高—降低的变化趋势, 即在腐解 45~60 天左右出现了镁的“富集”现象, 残留率从 45 天时的 26.5%~58.5% 上升至 60 天时的 32.0%~74.0%。

2.5 绿肥铁、锰、铜、锌残留率的变化

绿肥铁、锰残留率均呈下降—升高—下降的变化趋势, 且分别在腐解 45~60 天和 45~75 天出现了养分的阶段性“富集”现象, 但均以低盐分土壤中苕子的残留率最低 (图 4)。

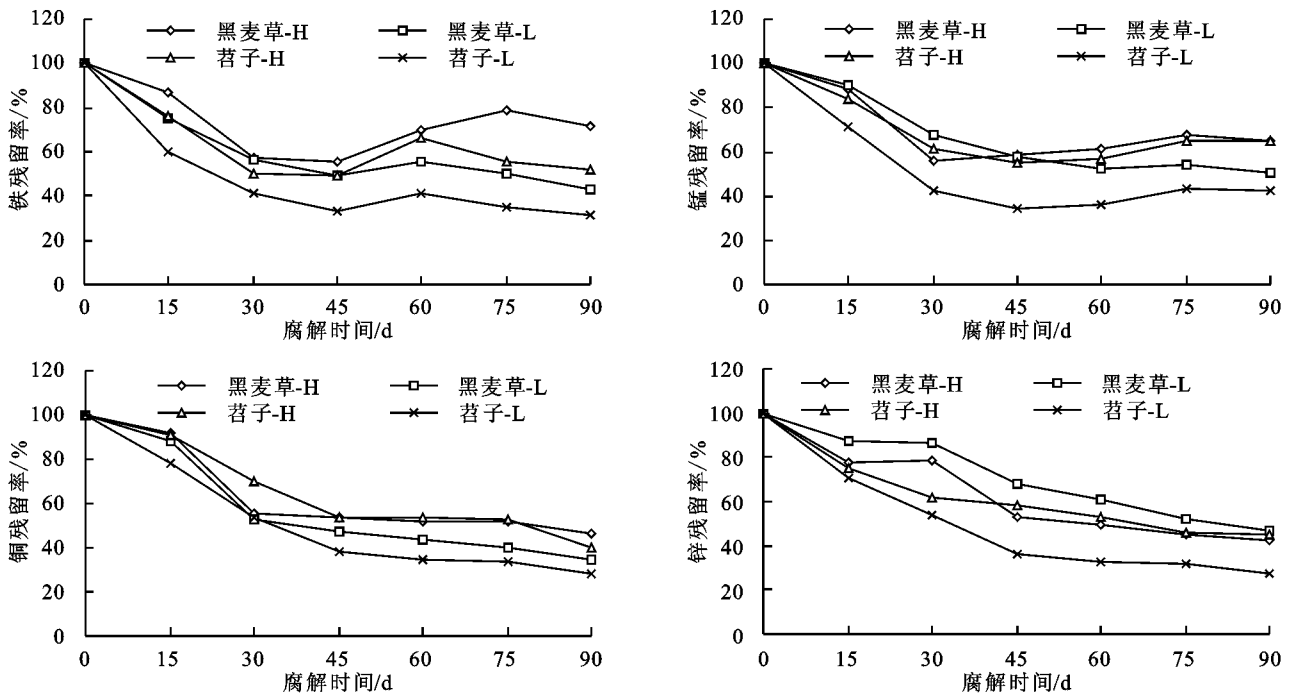


图 4 绿肥铁、锰、铜、锌残留率变化

绿肥铜的释放主要集中在腐解前 45 天, 高盐分地块苕子与黑麦草铜的残留率分别为 53.7% 和 53.5%, 低

盐分地块的残留率分别为 38.6% 和 47.5%, 腐解 90 天, 两地块铜的残留率分别为 40.3%~46.0% 和

28.6%~35.0%。可见,土壤盐分对铜的释放速率的影响要高于绿肥本身特性对其的影响。

绿肥锌的残留率总体以黑麦草高于苕子,且仍以低盐分土壤中苕子锌残留率最低。与钙、锰仅在腐解前期出现低盐分地块残留率高于高盐分地块的变化规律不同,黑麦草锌的残留率在整个试验期间均以低盐分土壤中较高,这可能与锌的强水解性和黑麦草腐解过程中产生的酸性有机物质有关。

2.6 绿肥腐解 90 天后的残留率

黑麦草、苕子分别在高盐分和低盐分地块腐解 90 天后,其养分残留率有很大差异(表 3)。绿肥中有机碳及大量和中微量元素均以低盐分土壤中苕子的残留率最低。绿肥有机碳、氮、磷、钾、钠在不同盐分土壤中的腐解率均高于钙、镁、铁、锌等中微量元素,以上养分元素在高盐分土壤中的残留率明显高于低盐分土壤,且总体以黑麦草残留率较高。

表 3 90 天后绿肥的养分残留率 单位:%

养分	高盐分		低盐分	
	黑麦草	苕子	黑麦草	苕子
TOC	32.00±2.47a	20.00±6.14b	23.30±1.77b	13.70±0.81c
N	32.60±1.54a	5.08±1.27c	24.90±4.17b	4.44±0.14c
P	13.80±1.37a	10.10±1.90b	10.60±0.71b	9.40±0.66b
K	7.97±0.56a	3.98±0.13c	4.85±0.21b	1.58±0.39d
Na	36.20±1.61b	49.20±0.89a	8.41±0.76c	5.17±0.05d
Ca	56.40±1.21a	41.50±2.63c	47.40±2.15b	21.40±2.34d
Mg	67.60±2.91a	40.10±5.03b	40.50±2.27b	22.30±3.84c
Fe	72.00±2.10a	52.00±0.48b	43.40±4.89c	31.70±1.57d
Mn	65.40±1.85a	65.30±1.81a	50.50±0.99b	42.00±0.10c
Cu	46.00±2.37a	40.30±3.59b	35.00±1.44c	28.60±0.96d
Zn	42.60±0.88b	44.80±2.17ab	46.70±1.88a	27.80±2.33c

3 讨论

3.1 不同盐分土壤环境对绿肥干物质及有机碳释放规律的影响

绿肥残体的腐解,除受其本身化学组分的影响外,还与其腐解时的环境条件、水热状况、土壤质地、pH 等外界环境条件密切相关^[12-13]。前人^[14]对不同有机物料在南方土壤、棕壤、中部褐土、娄土、栗钙土、白浆土以及东北黑土等不同类型土壤中的腐解特征和平衡参数进行过大量研究,但对绿肥在滨海盐潮土中的腐解动态却鲜有报道,仅张彦才等^[15]对小麦秸秆在砂质黏壤潮土不同土层中的腐质化系数作了相关研究。本试验中的高盐分地块为典型的滨海盐潮土,具有盐分含量高、有机质含量低、通气性差等特点,土壤微生物的种类、数量、活性等也因此受到限制,而绿肥腐解主要是靠微生物的作用^[7]。因此,相对于低盐分地块,高盐分地块绿肥的腐解率显著降低,90 天时黑麦草、苕子的干物质和有机碳残留率分别较低盐分地

块高 11.7%~12.0%和 6.35%~8.76%。

3.2 不同盐分土壤环境对绿肥氮磷钾释放规律的影响

绿肥在土壤中的分解是一个复杂的生物化学过程,本研究中,苕子氮、钾的释放均在腐解 15 天后达到高峰期,这与前人^[13,16]在箭筈豌豆、绿豆等豆科绿肥及二月兰上的研究结论基本一致。而有关磷的释放,多数研究^[17-18]结果表明,绿肥磷在最初 2~3 周释放较快,之后释放速率减慢。本试验中,苕子磷的释放在腐解 75 天内呈逐步释放态势,之后趋于停滞,但前人也有磷的释放最初两周为负值的报道^[16],这可能与各地土壤本身的磷素状况及温度、水分等综合因素有关。

不同盐分土壤环境下,黑麦草磷、钾释放态势与苕子相似,但黑麦草中氮在整个腐解过程中呈持续释放状态,未出现明显的高峰期。原因可能是在相同的外界条件下,豆科绿肥由于其自身能够固定大气中的氮素,具有较高的氮素含量和较低的 C/N(11~25),因此前期氮素矿化速率较快。相反,禾本科绿肥具有相对低的氮素含量和较高的 C/N(50~100),由于其较高的固持氮素能力进而负面影响其氮素有效性。这与鲁耀等^[19]的研究结论一致。

本研究结果表明,不同盐分土壤环境下,绿肥苕子养分累积释放速率表现为 K>N>P,黑麦草为 K>P>N,钾的释放速率最快,最终的累积释放量也最高,为 92.0%~98.4%。这是因为钾在植物体中不以化合态存在,而以离子及无机盐形式存在于细胞或植物组织中,易于分解释放,而氮、磷绝大部分以蛋白质、氨基酸、核酸、磷脂等有机态形式存在,需要通过微生物的分解来释放^[20]。前人^[16-17]对绿肥养分释放速率的研究也出现过类似的 N>P 或 P>N 的不同结论,是否与环境因素有关,其原因还有待进一步探讨。

3.3 不同盐分土壤环境对绿肥中微量元素释放规律的影响

钠在植株体内的存在形态与钾类似,但在高盐分地块,绿肥苕子、黑麦草的钠残留率均显著高于低盐分地块。众所周知,钠离子是滨海盐土造成植物盐害及产生盐渍生境的主要离子^[2-3],本研究中高盐分地块土壤钠离子含量为 4.74 g/kg,基于离子平衡原理,土壤本身较高的钠离子必然对绿肥中钠向土壤溶液中的释放产生阻碍作用,从而使绿肥中钠的释放速率和释放量与低盐分地块相比差距明显。

植物或其根系在腐解过程中会出现阶段性的养分“富集”现象,这在前人^[21-22]的研究中多有报道。本试验中,中微量元素的腐解释放率明显低于大量元素,且在镁、铁、锰的释放过程中也出现了“养分富集”现象,不同盐分地块绿肥镁、铁、锰养分释放的富集阶段分别出现在腐解 45~60 天和 45~75 天。赵娜

等^[17]对旱地豆科绿肥腐解规律的研究表明,铁、锰的富集均出现在腐解 119 天,同时出现富集现象的还有磷、钙、铜、锌等养分,且富集时间也较滞后,这可能与干旱试验条件有关。辛国荣等^[23]对“黑麦草—水稻”草田轮作系统中黑麦草腐解规律的研究中,黑麦草钙、镁、铁、锰的释放就未曾出现“富集”现象。可见,土壤水分在绿肥腐解过程中起着重要作用。本试验是在 4—7 月份进行,期间经历了梅雨季节,气温较高,降水较集中,绿肥前期腐解过程中,铁、锰以溶解度较高的还原态(Fe^{2+} 、 Mn^{2+})释放,而在后期水旱交替过程中,已释放的还原态铁、锰又快速转变为氧化态(Fe^{3+} 、 Mn^{4+})铁、锰吸附于绿肥残体,从而造成“富集”。而镁的“富集”原因可能是滨海盐渍土壤中较高浓度的镁迁移至尼龙网袋中并被绿肥残体吸附而累积。

4 结论

(1)除总有机碳和钠离子外,苕子的氮磷钾及中微量元素等初始养分含量均显著高于黑麦草;绿肥腐解过程中,不同盐分地块黑麦草干物质残留率、总有机碳含量和 C/N 总体高于苕子。

(2)前 15 天为苕子氮、钾释放高峰期,第 15 天时氮、钾残留率分别为 20.4%~34.0%和 13.2%~18.1%;黑麦草钾素释放高峰期为前 45 天,不同盐分土壤环境下累积释放率分别为 89.3%和 89.9%;黑麦草、苕子磷在腐解过程中均呈持续释放状态。

(3)低盐分地块,苕子、黑麦草腐解 90 天后钠的累积释放率分别为 94.8%和 92.4%,而高盐分地块分别为 63.8%和 50.8%。腐解 90 天后,镁、钙、锌残留率整体以黑麦草高于苕子;铜的释放主要集中前 45 天,高盐分土壤环境明显影响铜的释放;镁、铁、锰分别在腐解 45~60 天和 45~75 天出现养分“富集”现象。

(4)不同时期绿肥中养分残留率总体以低盐分地块苕子残留率最低。禾本科绿肥干物质及养分残留率总体上高于豆科绿肥,高盐分明显阻滞了绿肥氮、钙、镁、铁、锰、铜和锌等养分的释放。

参考文献:

[1] Chen X P, Cui Z L, Fan M S, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. *Nature*, 2014, 514(7523):486-489.

[2] 王建. 江苏省海岸滩涂及其利用潜力[M]. 北京:海洋出版社, 2012.

[3] 徐鹏程,冷翔鹏,刘更森,等. 盐碱土改良利用研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2014, 42(5):293-298.

[4] 曹卫东,黄鸿翔. 关于我国恢复和发展绿肥若干问题的思考[J]. *中国土壤与肥料*, 2009(4):1-3.

[5] Sun Z Z, OuYang Z, Li F D, et al. Impact of cutting a clover crop on the nitrogen supplied to winter wheat in

an intercropping system[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2012, 3(1):73-79.

- [6] Gómezmunoz B, Hatch D J, Bol R, et al. Nutrient dynamics during decomposition of the residues from a sown legume or ruderal plant cover in an olive oil orchard[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2014, 184(2):115-123.
- [7] 陈宁,高玲,刘国道,等. 热带豆科绿肥腐解特性探究[J]. *热带作物学报*, 2016, 37(8):1470-1475.
- [8] 张久东,包兴国,曹卫东,等. 长期施用绿肥减施化肥对毛叶苕子产草量和土壤肥力的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2017(6):66-70.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
- [10] 宋学贵,胡庭兴,鲜骏仁,等. 川西南常绿阔叶林凋落物分解及养分释放对模拟氮沉降的响应[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(10):2167-2172.
- [11] 吕丽霞,廖超英,张立新,等. 渭北果园白三叶与黑麦草不同配比的腐解及养分释放规律[J]. *西北农业学报*, 2013, 22(6):162-169.
- [12] Hadas A, Kautsky L, Goek M, et al. Rates of decomposition of plant residues and available nitrogen in soil, related to residue composition through simulation of carbon and nitrogen turnover[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(2):255-266.
- [13] 潘福霞,鲁剑巍,刘威,等. 3 种不同绿肥的腐解和养分释放特征研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(1):216-223.
- [14] 陈小燕. 土壤中有有机残体腐解过程的有机酸动态变化研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学, 2008.
- [15] 张彦才,赵哲权,王泽文,等. 腐解条件对有机物料腐殖化系数的影响[J]. *土壤肥料*, 1991(1):7-9.
- [16] 刘佳,陈信友,张杰,等. 绿肥作物二月兰腐解及养分释放特征研究[J]. *中国草地学报*, 2013, 35(6):58-63.
- [17] 赵娜,赵护兵,鱼昌为,等. 旱地豆科绿肥腐解及养分释放动态研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(5):1179-1187.
- [18] 孔伟,耿明建,储刘专,等. 光叶紫花苕子在烟田中的腐解及养分释放动态研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2011(1):64-68.
- [19] 鲁耀,郑波,段宗颜,等. 不同有机物料在植烟土壤中的腐解及活性有机碳、氮含量的变化[J]. *西南农业学报*, 2014, 27(4):1616-1620.
- [20] 崔志强,李宪利,崔天舒. 果园绿肥腐解及养分释放动态研究[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(22):121-127.
- [21] 张秀娟,吴楚,梅莉,等. 水曲柳和落叶松人工林根系分解与养分释放[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(8):1370-1376.
- [22] 李逢雨,孙锡发,冯文强,等. 麦秆、油菜秆还田腐解速率及养分释放规律研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(2):374-380.
- [23] 辛国荣,杨中艺. “黑麦草—水稻”草田轮作系统研究Ⅱ黑麦草残留物的田间分解及营养元素的释放动态[J]. *草业学报*, 2004, 13(3):80-84.