水盐梯度对滨海湿地土壤养分指标和酶活性的影响

仙旋旋，孔范龙，朱梅珂，李 悦，郗 敏
（青岛大学 环境科学与工程学院，山东 青岛 266071）

摘 要：[目的] 研究海水入侵对滨海湿地土壤性质的影响，为分析水盐梯度对土壤养分指标和酶活性的影响机制提供依据。[方法] 采集胶州湾滨海湿地表层土壤并设计室内模拟试验，测定不同水盐梯度上的土壤养分指标和酶活性。[结果] 盐分和水分对土壤 pH 值和容重(BD)的影响显著；土壤有机质(TOM)、氨氮(NH_4^+-N)、速效磷(AP)、速效钾(AK)、蔗糖酶(SA)、脲酶(UA)、碱性磷酸酶(APA)均随水梯度的增加表现为先升高后降低的趋势，在 30%水梯度时达到最高值；土壤 TOM，AP，AK，SA，UA，APA 均随盐梯度的增加而降低，NH_4^+-N 随盐梯度的增加而增加。土壤 SA 与 TOM，AP，AK 存在显著正相关关系；APA 与 TOM，AP，AK，BD 显著正相关；UA 与 pH 值，BD 显著正相关，与 NH_4^+-N 具有一定的相关性。[结论] 在一定范围内，土壤中水分过高或过低、盐分增加均会对土壤养分含量和酶活性产生抑制作用；土壤养分和酶活性之间存在密切的相关关系。

关键词：水盐梯度；养分指标；酶活性；滨海湿地
文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2019)01-0065-07 **中图分类号**：S154.1，S158

文献参数：仙旋旋，孔范龙，朱梅珂，等. 水盐梯度对滨海湿地土壤养分指标和酶活性的影响[J]. 水土保持通报，2019，39(1)：65-71. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2019.01.011；Xian Xuanxuan，Kong Fanlong，Zhu Meike，et al. Effects of water and salt gradients on soil nutrient indices and enzyme activities in coastal wetlands[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，39(1)：65-71.

Effects of Water and Salt Gradients on Soil Nutrient Indices and Enzyme Activities in Coastal Wetlands

Xian Xuanxuan，Kong Fanlong，Zhu Meike，Li Yue，Xi Min
(*College of Environmental Science and Engineering*，*Qingdao University*，*Qingdao*，*Shandong* 266071，*China*)

Abstract：[Objective] To analyze the influence mechanism of water and salt contents on soil nutrient and enzymatic activity，in order to provide scientific basis for exploring the effect of seawater intrusion on coastal wetland soil. [Methods] The surface soil of the coastal wetland in Jiaozhou Bay was collected and the simulation experiments were conducted in laboratory to determine the soil nutrient index and enzymatic activity under different water salt gradients. [Results] Soil pH value and bulk density (BD) were significantly affected by salinity and moisture，respectively. With the increase of soil water gradient，the total organic matter (TOM)，ammonium nitrogen (NH_4^+-N)，available phosphorus (AP)，available potassium (AK)，sucrase activity (SA)，urease activity (UA) and alkaline phosphatase activity (APA) increased initially and then decreased，reaching the maximum value at 30% water gradient. TOM，AP，AK，SA，UA and APA decreased with the increase of soil salinity gradient，while NH_4^+-N showed an opposite variation trend. The correlation analysis showed that SA was positively correlated with TOM，AP and AK，and APA was positively correlated with TOM，AP，AK and BD. In addition，UA was positively correlated with soil pH value and BD，and had a certain correlation with NH_4^+-N. [Conclusion] In a certain range，excessive or low

收稿日期：2018-06-28 **修回日期**：2018-07-25
资助项目：国家自然科学基金项目“滨海小流域湿地‘DOC 流’关键过程及机理研究”(41771098)
第一作者：仙旋旋(1994—)，女(汉族)，山东省济宁市人，硕士研究生，研究方向为滨海湿地碳循环。E-mail：17864260197@163.com。
通信作者：郗敏(1978—)，女(汉族)，山东省泰安市人，博士，教授，硕士生导师，主要从事湿地变化及环境效应研究。E-mail：ximin@qdu.edu.cn。

water content and increased salt content can inhibit the soil nutrient contents and enzymatic activities, and there is a close relationship between soil nutrients and enzyme activities.

Keywords: water salt gradient; nutrient index; enzyme activity; coastal wetlands

滨海湿地作为一种重要的湿地类型,在生物多样性维持、污染调控、气候调节[1-2]等方面发挥着巨大的作用。相比于其他湿地类型,由于其地理位置的特殊性,容易受到海水入侵的影响。其直接影响是水分和盐分的不断增加,而这种水盐环境的变化势必会对土壤理化和生物性质产生一定的直接或间接影响。滨海湿地土壤为其生态服务功能提供了载体,是碳存储、维持生物多样性以及控制污染等功能的基础[3]。因此,充分了解水分和盐分对土壤性质的影响,对于探究土壤盐渍化的机理和科学评价海水入侵对滨海湿地土壤质量的影响具有重要意义。

关于对土壤水分和盐分含量对土壤性质影响的研究主要在农田[4-6]及滨海湿地生态系统[7]中展开。对于农田生态系统的研究主要关注了人为作用导致的农田土壤盐渍化对土壤理化性质的影响、淹水栽培对设施土壤性质的影响、咸水灌溉对作物产量及土壤理化性质的影响等方面。与农田土壤相比,滨海湿地土壤以砂粒和粉粒为主,黏粒较少,具有粒径大、孔隙度大、容重小的特点[8],在垂直海岸线方向具有明显的水盐梯度[9],因而滨海湿地土壤受水盐含量的影响明显,且影响机制与农田生态系统存在差异。而目前对于滨海湿地水盐含量和土壤性质的研究主要集中在闽江河口湿地、崇明滩涂湿地、黄河三角洲湿地等区域,主要关注了盐度梯度下有机碳的分布、生态化学计量特征、土壤质量指数的影响因素等方面,而关于不同水盐条件下土壤养分指标和生物性质的研究较为匮乏。

土壤养分和酶是滨海湿地生态系统重要的土壤指标,土壤养分是影响生态系统生产力的主导因素,土壤酶参与土壤中许多重要的生物化学过程和物质循环,与土壤养分密切相关,二者均可作为反映土壤质量变化、生产力和生物活性的有效指标[10]。研究表明,土壤养分和酶活性受土壤内部环境影响显著,水盐含量是土壤养分和酶活性的重要影响因素[4-5]。现有研究一般采用实地采样的方法探究土壤养分和酶等的影响因素,该方法无法避免样地间其他影响因素所造成的差异性,因此关于水盐梯度对滨海湿地土壤养分和酶活性的影响,特别是其影响机理问题需要引起关注。

胶州湾滨海湿地是山东半岛面积最大的典型河口海湾型湿地,部分区域已遭到严重的海水入侵,由此造成的土壤质量下降对当地的农业产生了不利影响。本文拟选取胶州湾湿地存在海水入侵风险的样地采集土壤样品,通过实验室控制试验对其进行不同水分和盐分处理,研究水分和盐分变化对滨海湿地土壤养分指标和酶的影响,以期为探究滨海湿地土壤质量及其影响因素提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 土壤样品采集

模拟试验所用土壤采自胶州湾滨海湿地表层土壤,原生植被为芦苇,距离海岸线垂直距离 7.14 km,该区域存在海水入侵的潜在风险。土样采集回来经自然风干,剔除可见动植物残体,磨细并过筛后,将土样充分混合,保证其土壤性质相对均一,备用。样地土壤含水量 28%,含盐量 0.9%,属于轻度盐渍化土[9]。

1.2 试验方案设计

试验包括预试验和正式试验两部分。预试验过程中,将相同质量的土样(1 kg)分别装盆,用蒸馏水维持土壤含水量为 20%,置于 25 ℃培养室预培养 2 周,以恢复原土壤微生物环境。2 周之后进入正式试验,采用海盐和去离子水配制不同浓度的"人造海水"并加入到预培养后的土壤中,设置土壤含盐量为 4 种盐梯度,即 S_1(0.9%,轻度盐渍化土),S_2(1.4%,中度盐渍化土),S_3(1.9%,重度盐渍化土)和 S_4(2.4%,盐土)。与 4 种水梯度(W_1 为 15%,W_2 为 30%,W_3 为 45%,W_4 为 60%)两两交叉,共 16 种处理分别加到预培养后的土壤中,每种水盐梯度处理设计 2 组重复试验,恒温 25 ℃,每日光照 12 h,培养期间每天称重并补充水分使其维持设定的土壤水分不变。分别在 15,30,45 d(记为 T_1,T_2,T_3)取土样,并使其自然风干并磨细过筛,用来测定其土壤性质。

1.3 土壤指标测定

土壤含水量和容重(BD)采用烘干法在 105℃下烘干称重测定;土壤含盐量用盐度计测定(水土比为 5∶1);土壤有机质(TOM)、氨氮(NH_4^+-N)分别采用水合热重铬酸钾氧化法、靛酚蓝比色法测定;土壤速效养分速效磷(AP)和速效钾(AK)分别采用钼锑比色法、四苯硼钠比浊法测定[11];蔗糖酶活性(SA)、脲

酶活性(UA)以及碱性磷酸酶活性(APA)分别采用3,5 二硝基水杨酸比色法、苯酚钠—次氯酸钠比色法和磷酸苯二钠比色法测定[12]。

1.4　数据处理

采用 Excel 2013 和 SPSS 20.0 软件对数据进行分析。采用单因素(one-way ANOVA)和 Duncan 检验对不同水盐梯度及时间梯度下的各指标含量进行方差分析和多重比较。用 Pearson 法对土壤各指标进行相关分析。采用 Origin 9.0 软件作图。

2　结果与分析

2.1　水盐梯度对土壤 pH 值和容重的影响

pH 值和容重是最基本的土壤理化性质,与土壤养分含量及酶活性大小密切相关。pH 值是土壤养分和酶的重要影响因素,水盐含量可以通过影响 pH 值大小对二者产生直接或间接作用[13];容重能够反映土壤肥力的高低、通透性的强弱,其大小会对水分入渗与土壤侵蚀产生影响[4]。土壤中水分和盐分的变化影响了其 pH 值和容重(表 1 和图 1)。随水分增加,土壤 pH 值升高,但增长趋势不显著;且同一水梯度下 pH 值随时间增加均不显著。随盐分增加,土壤 pH 值显著降低;同一盐梯度下 pH 值随时间增加而增加,除 S_1 梯度增加不显著外,其余 3 个梯度从 T_1 到 T_2 显著增加(表 1)。土壤容重(BD)随含水量增加呈现先增加后降低的趋势,在 W_2 水梯度下土壤容重最大,W_1 梯度最小,除 W_2 和 W_3 梯度下土壤容重差异不显著外,其余水梯度间差异显著;不同采样时间土壤容重变无明显化规律。含盐量增加,土壤容重减小,但不同盐梯度下容重差异不显著;且随时间增加土壤容重变化不显著。

表 1　土壤指标含量及差异性在不同取样时间和不同水盐梯度下的变化情况

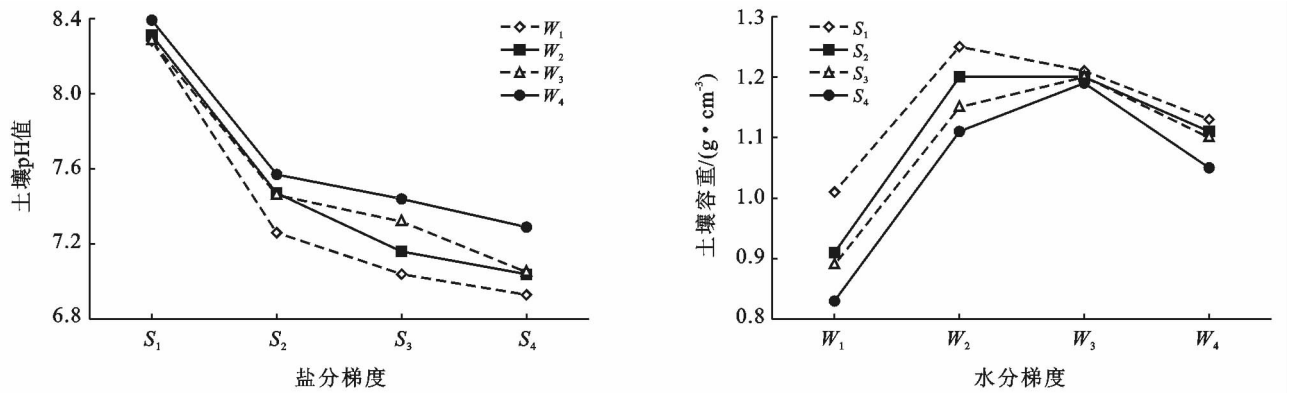
水分/盐分	时间	pH 值		BD/(g·cm^{-3})		TOM/(g·kg^{-1})		NH_4^+-N/(mg·kg^{-1})		AP/(mg·kg^{-1})		AK/(mg·kg^{-1})	
		均值	数值	均值	数值	均值	数值	均值	数值	均值	数值	均值	数值
	T_1		7.12^{a}		0.94^{a}		14.55^{a}		9.77^{a}		7.83^{a}		0.98^{a}
W_1	T_2	7.38^{a}	7.46^{a}	0.91^{c}	0.96^{a}	12.62^{a}	13.06^{a}	13.21^{b}	12.72^{a}	7.29^{a}	8.54^{a}	0.74^{a}	0.58^{b}
	T_3		7.55^{a}		0.84^{a}		10.24^{b}		17.15^{a}		5.51^{b}		0.64^{b}
	T_1		7.32^{a}		1.24^{a}		14.98^{a}		13.32^{b}		8.56^{a}		1.21^{a}
W_2	T_2	7.50^{a}	7.53^{a}	1.18^{a}	1.12^{b}	14.05^{a}	14.63^{a}	17.17^{a}	16.07^{b}	8.27^{a}	9.32^{a}	0.85^{a}	0.63^{b}
	T_3		7.64^{a}		1.17^{ab}		12.54^{a}		22.11^{a}		6.94^{a}		0.68^{b}
	T_1		7.38^{a}		1.19^{b}		13.64^{a}		10.29^{a}		8.22^{a}		1.14^{a}
W_3	T_2	7.53^{a}	7.58^{a}	1.20^{a}	1.18^{b}	13.15^{a}	14.32^{a}	11.48^{b}	11.07^{a}	6.81^{ab}	5.63^{a}	0.82^{a}	0.63^{b}
	T_3		7.63^{a}		1.22^{a}		11.48^{a}		13.07^{a}		6.56^{a}		0.69^{b}
	T_1		7.49^{a}		1.05^{b}		13.64^{a}		9.67^{a}		7.55^{a}		1.01^{a}
W_4	T_2	7.67^{a}	7.87^{a}	1.10^{b}	1.06^{b}	12.80^{a}	14.19^{a}	10.12^{b}	10.68^{a}	5.29^{b}	3.78^{b}	0.77^{a}	0.60^{b}
	T_3		7.66^{a}		1.18^{a}		10.57^{b}		10.00^{a}		4.54^{b}		0.68^{b}
	T_1		8.35^{a}		1.14^{a}		16.92^{a}		7.40^{a}		9.68^{a}		1.25^{a}
S_1	T_2	8.32^{a}	8.28^{a}	1.15^{a}	1.16^{a}	14.92^{a}	15.90^{a}	9.98^{c}	10.27^{a}	8.73^{a}	8.26^{a}	0.88^{a}	0.65^{b}
	T_3		8.32^{a}		1.15^{a}		11.93^{b}		12.27^{a}		8.26^{a}		0.76^{b}
	T_1		7.23^{b}		1.12^{a}		15.05^{a}		8.13^{a}		8.03^{a}		1.10^{a}
S_2	T_2	7.44^{b}	7.51^{a}	1.11^{a}	1.09^{a}	13.73^{ab}	14.66^{a}	11.47^{bc}	12.17^{a}	7.15^{ab}	7.44^{a}	0.80^{a}	0.62^{b}
	T_3		7.58^{a}		1.12^{a}		11.46^{a}		14.13^{a}		5.99^{a}		0.68^{b}
	T_1		6.91^{b}		1.10^{a}		13.28^{a}		11.90^{a}		7.63^{a}		1.03^{a}
S_3	T_2	7.24^{c}	7.42^{a}	1.08^{a}	1.06^{a}	12.46^{bc}	13.04^{a}	14.30^{ab}	13.41^{a}	6.48^{bc}	6.46^{a}	0.77^{a}	0.60^{b}
	T_3		7.39^{a}		1.09^{a}		11.06^{a}		17.60^{a}		5.35^{a}		0.65^{b}
	T_1		6.82^{b}		1.07^{a}		11.55^{ab}		15.63^{a}		6.84^{a}		0.96^{a}
S_4	T_2	7.08^{c}	7.22^{a}	1.05^{a}	1.01^{a}	11.52^{c}	12.60^{a}	16.23^{a}	14.69^{a}	5.30^{c}	5.10^{b}	0.72^{a}	0.57^{c}
	T_3		7.19^{a}		1.05^{a}		10.39^{b}		18.35^{a}		3.96^{b}		0.62^{b}

注:BD 为容重;TOM 为有机质;NH_4^+-N 为铵态氮;AP 为速效磷;AK 为速效钾。同列数据后不同小写字母表示组内差异显著。下同。

土壤 pH 值随含水量的增加而升高,可能是不同含水量对土壤缓冲物质冲击作用不同,导致土壤出现不同程度的轻微碱化[14]。盐度增加使得土壤 pH 值降低,原因可以从两方面分析,一是因为可溶性盐阳离子和阴离子的加入可以将土壤表面上吸附的 H^+,Al^{3+} 和 OH^- 代换出来,当代换出的 H^+ 和 Al^{3+} 数量大于的 OH^- 数量,土壤 pH 值会下降[15]。

另一方面,海盐溶液带入的 SO_4^{2-} 等强酸性离子也是 pH 值下降的一个原因。随时间增加,土壤 pH 值稍有回升,可能是因为盐离子为一次性加入,盐离子对 H^+,Al^{3+} 和 OH^- 的代换平衡随时间增加稍有偏移的结果。随含水量增加,土壤颗粒在固结过程中

受到的水压力作用减小，导致土壤孔隙度增大，容重减小[16]，这与乔宇鑫等人所得出的土壤容重与年降水量和湿润度呈显著负相关关系[17]的结论一致。盐度的变化会对土壤结构、团聚体和孔隙度等产生影响[18]，王维奇等人的研究也证明随土壤容重会随盐度增加而减小[7]。



注：图中 S 为土壤含盐量 4 种盐梯度，即 S_1(0.9%，轻度盐渍化土)，S_2(1.4%，中度盐渍化土)，S_3(1.9%，重度盐渍化土)和 S_4(2.4%，盐土)；W 为 4 种水梯度(W_1 为 15%，W_2 为 30%，W_3 为 45%，W_4 为 60%)。下同。

图 1 滨海湿地不同水盐梯度条件对土壤 pH 值和容重(BD)的影响

2.2 水盐梯度对土壤养分指标的影响

土壤养分指标在水盐梯度上的含量变化具有规律性(表 1 和图 2)。在水梯度上，4 个指标在土壤中的含量均表现出先升高后降低的趋势，多为 W_2 水梯度上达到最高；在盐梯度上，除 NH_4^+-N 含量表现出升高的趋势外，其余 3 个指标(TOM，AP 和 AK)都是递减的趋势。TOM 在不同水梯度下差异不显著，相邻盐梯度下差异不显著但不相邻盐梯度下 TOM 差异显著；随时间增加，不同处理条件下 TOM 均表现出降低的现象，也说明了 TOM 对水盐胁迫的响应。NH_4^+-N 在 W_2 水梯度下显著高于其他 3 个梯度，W_4 比 W_2 降低了 41.1%；土壤中盐分增加对 NH_4^+-N 产生了正向促进作用，S_4 比 S_1 增加 62.6%；而随时间变化，不论是在水梯度还是在盐梯度上，NH_4^+-N 含量都有所增加。速效养分 AP 含量在 W_2 到 W_4 和 S_1 到 S_4 梯度上均显著降低，分别降低了 36.0%和 39.3%；在时间梯度上基本表现出降低趋势。而 AK 在水盐梯度上降低不显著，在 T_2 和 T_3 时间梯度上差异不显著但均显著低于 T_1 时间梯度。

研究表明，土壤含水量过高和过低都对土壤养分指标的含量产生了抑制作用。土壤含水量会影响土壤通气性、氧化还原电位、土壤有效氮(NO_3^- 和 NH_4^+)分布及其对微生物的有效性等，从而对土壤碳的循环、速效养分转化、硝化和反硝化等过程产生影响[7]。含水量过高，土壤内部趋近缺氧环境，有机质在还原环境中被加速分解，含量降低[19]；氮矿化为 NH_4^+-N 在一定的含水量范围内会随着水分增加而增加，当土壤含水量超过适宜范围则会降低[20]；AP 的降低可能是由于土壤含水量的增加，pH 值升高，导致正磷酸盐量降低，间接导致 AP 含量的下降[21]；由于土壤有机质具有突出的保钾作用，AK 的降低主要是因为有机质的降低引起的[16]。土壤含水量过低时，微生物活性较低[22]，有机质，NH_4^+-N，速效养分等的合成受到限制。盐分影响土壤碳、氮、磷等养分指标是通过影响土壤中生物、物理和化学过程实现的。土壤盐分的增加会加速有机质的分解，降低其在土壤中的含量[23]，通过抑制土壤微生物活性降低速效养分的合成速率，进而使得速效磷和速效钾的含量随盐分的增加而降低；同时，盐度的增加会抑制硝化过程，减缓 NH_4^+-N 向硝态、亚硝态氮的转化的正向反应速率[24]，使得 NH_4^+-N 含量随土壤盐分的增加而增加。

2.3 水盐梯度对土壤酶活性的影响

土壤中不同酶活性在水盐梯度上表现出相似的变化规律(图 3)。随水分增加，酶活性先升高后降低，表明酶在一定的含水量范围内具有较高的活性；随盐度增加，则表现出不同程度的降低趋势，说明盐分的增加对酶活性具有抑制作用。SA 和 APA 在水梯度 W_2，盐梯度 S_1 处理下活性最高，在水梯度 W_4，盐梯度 S_4 处理下活性最低，也反映出土壤中过多的水分和盐分对蔗糖酶和碱性磷酸酶活性的抑制作用。而 UA 在水梯度 W_3，盐梯度 S_1 处理下活性最高；且在同一水梯度上，UA 先升高后降低，在 W_3 水梯度达到最高。除 W_1 和 W_3 水梯度上，高盐度(S_4)和低盐度(S_1)下的 SA 具有显著差异外，3 种酶活性在不同盐度上均无显著性差异。3 种酶活性的平均值在盐

度梯度上分别降低 41.0%,28.2%和 9.1%,这说明 APA 比 SA 和 UA 具有更高的耐盐性。在盐梯度 S_2 上,不同水梯度之间 SA 差异不显著;在盐梯度 S_1 和 S_4 上,不同水梯度之间 UA 差异不显著;其余情况下,各水梯度上最高酶活性均显著高于最低酶活性。不同酶在水盐梯度上的显著性差异分析表明,在本研究水盐含量跨度上,水分对酶活性的影响大于盐度对酶活性的影响。

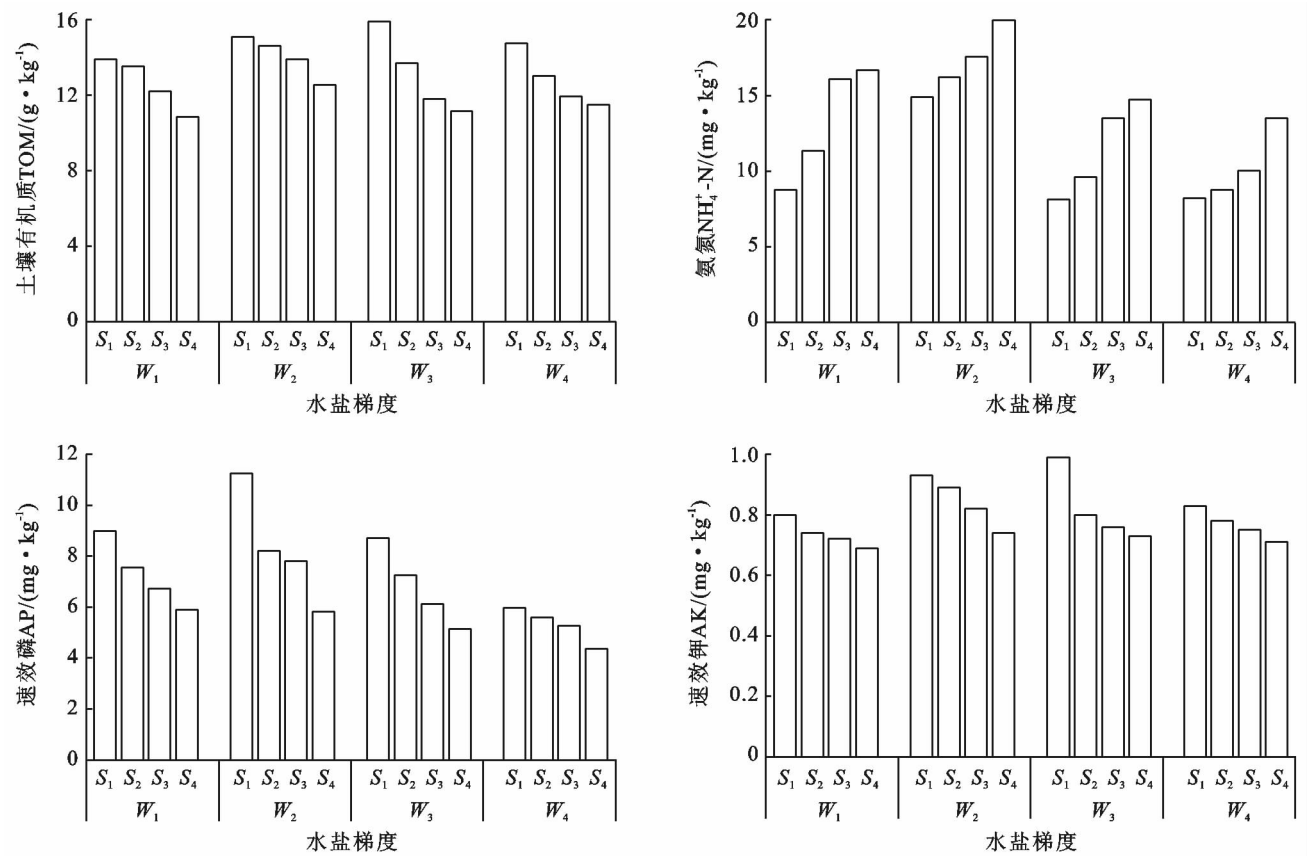


图 2　滨海湿地不同水盐梯度条件对土壤养分指标的影响

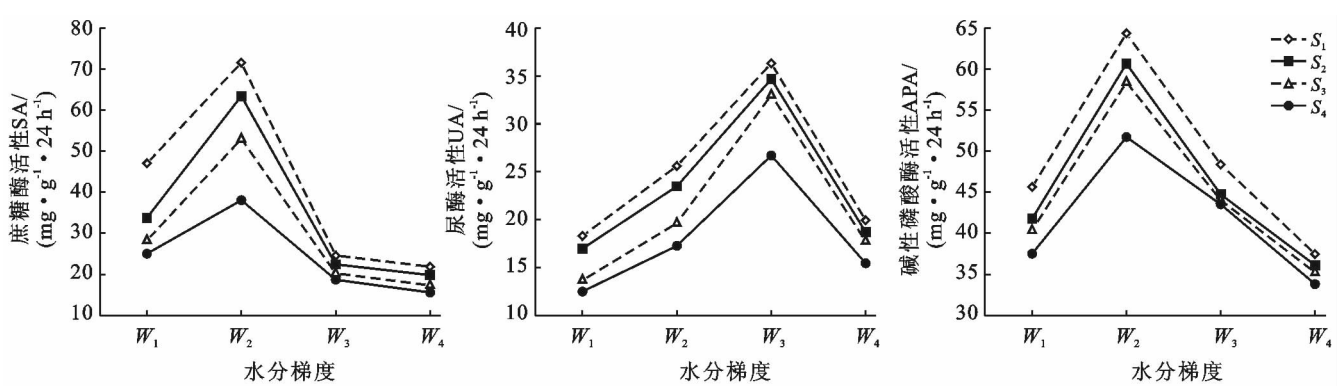


图 3　滨海湿地不同水盐梯度条件对土壤酶的影响

酶是土壤组分中最活跃的有机成分之一,具有很强的生物催化能力,它参与了土壤中几乎全部的物理化学反应过程和物质循环,对土壤代谢过程的推进具有重要的作用,其活性反映了土壤微生物的活性和各种生物化学过程的方向和强度,故经常被用来作为评估养分循环和土壤质量的指标。SA,UA 和 APA 是土壤碳、氮、磷等元素转化的重要参与者,土壤水分和盐分是酶活性大小的主要影响因素,且不同酶的最适水分和盐分区间具有差异[22,25]。本研究中,土壤中过多的水分和盐分都对 3 种酶活性的大小产生了抑制作用,同时土壤水分过低也会对酶活性产生不利影响。朱同彬等人对不同水分条件下土壤酶活性的变化进行了研究[26],结果表明,与 70%的田间持水量相比,过高的水分会显著抑制土壤脲酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶的活性。万忠梅等[27]的研究也证明了酶活性会随水分增加而降低这一结论。而在水分为限

制因子的干旱地区，水分缺乏导致土壤酶活性会随土壤水分的增加而增加，在田幼华等[28]的研究中，脲酶、各种磷酸酶的活性均随土壤水分含量的增加而显著增加，这与本文中 W_2 和 W_3 水梯度土壤酶活性高于 W_1 水梯度的结果一致。而盐分对土壤酶的影响主要包括两个方面，一是高浓度的盐分会通过离子毒害和渗透胁迫等效应直接对酶产生抑制作用，二是盐分通过影响其他因素对酶产生间接影响，如土壤理化性质、养分有效性、微生物的活性及数量等。关于盐分对土壤酶活性的抑制作用，在大部分的研究中都印证了这一结论[25,28-29]。冯棣等[25]在研究咸水灌溉对土壤酶活性的影响中发现，咸水灌溉会导致土壤中盐分增加且积累，使得土壤酶活性受到抑制。在田幼华等[28]的研究中，高盐分含量限制过氧化氢酶和脲酶的活性，增加中性磷酸酶和碱性磷酸酶的活性，这说明不同酶的耐盐性及适宜生长的盐分区间不同，与本文的研究结果一致。

2.4 养分指标与酶活性的相关性分析

经典型对应分析(CCA)及相关分析(图 4，表 2)可知，SA 与 TOM，AP，AK 之间呈显著或极显著正相关；APA 与 TOM，AP，AK，BD 之间极显著正相关；UA 与土壤 pH 值，BD 呈极显著正相关，与 NH_4^+-N 也具有一定的相关性，但 CCA 分析图 NH_4^+-N 箭头连线长度和相关分析都表明 UA 与 NH_4^+-N 的相关系数较小。

研究表明，土壤养分水平会对酶活性产生直接影响，同时，土壤酶也对养分水平具有一定的作用，二者之间存在紧密的联系。相关分析表明土壤 SA，UA，APA 活性均与土壤养分含量具有一定的相关关系。SA 是转化酶中的一种，与土壤中的养分含量关系十分密切[30]。通过对 SA 和养分指标的相关分析可以发现，SA 不仅与土壤有机质和速效养分显著相关，也与 APA 极显著相关；同时 APA 和 TOM，AP，AK 之间也具有相关关系，说明 SA 和 APA 均会在土壤碳、磷、钾元素的转化中起着非常重要的作用，崔东[30]等人的研究也说明了这一结论。而相比之下，UA 与土壤 TOM 及速效养分等相关系数很低，但受土壤理化指标 pH 值和 BD 影响较大，可能是因为土壤理化性质会对 UA 产生直接影响，而模拟试验土壤无植被生长，土壤养分含量对脲酶活性的间接影响会相对减弱，从而出现 UA 与 pH 值，BD 显著相关但与养分指标相关系数极低的情况。

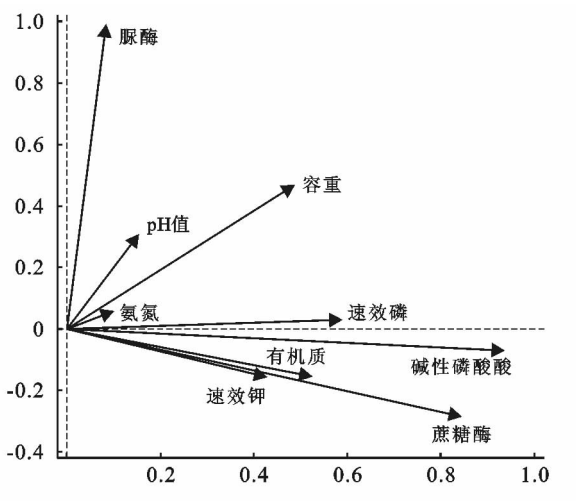


图 4 土壤养分指标和酶活性的典型对应分析

表 2 土壤养分指标和酶活性的相关性分析

指标	pH	BD	TOM	NH_4^+-N	AP	AK	SA	UA	APA
pH 值	1								
BD	0.300*	1							
TOM	0.426**	0.272	1						
NH_4^+-N	−0.358*	−0.147	−0.426**	1					
AP	0.302*	0.204	0.522**	−0.167	1				
AK	0.044	0.287*	0.465**	−0.373**	0.481**	1			
SA	0.135	0.236	0.472**	0.027	0.513**	0.458**	1		
UA	0.292*	0.523**	−0.113	0.085	0.066	−0.137	−0.264	1	
APA	0.064	0.475**	0.513**	0.063	0.565**	0.401**	0.658**	0.045	1

注：“**”表示差异极显著；“*”表示差异显著。SA 为蔗糖酶活性；UA 为脲酶活性；APA 为碱性磷酸酶活性。

3 结 论

不同水盐梯度下的滨海湿地土壤养分含量和酶活性存在一定的差异。随水梯度的增加，土壤 TOM，NH_4^+-N，AP，AK，SA，UA，APA 均表现出先升高后降低的趋势，在 30% 水梯度时达到最高值；随盐梯度的增加，土壤 TOM，AP，AK，SA，UA，APA 均呈降低趋势，NH_4^+-N 呈升高的趋势。相关分析表明土壤 SA，UA，APA 均与养分含量存在密切相关关系。土壤 SA 与 TOM，AP，AK 显著相关；APA 与 TOM，

AP,AK,BD 显著相关;UA 与 pH 值,BD 显著相关,与 NH_4^+-N 也具有一定的相关性。研究证实,在一定范围内,土壤中水分过高或过低、盐分增加均会对土壤养分含量和酶活性产生抑制作用。因此,海水入侵所造成的滨海湿地水盐环境变化对土壤所造成的影响应该引起广泛关注。

[参 考 文 献]

[1] 李伟,崔丽娟,赵欣胜,等. 中国滨海湿地及其生态系统服务功能研究概述[J]. 林业调查规划,2014,39(4):24-30.

[2] Xi Min, Kong Fanlong, Li Yue. Temporal variations in growth and aboveground biomass of phragmites australis and EVI Analysis in Jiaozhou Bay Coastal Salt Marshes, China[J]. Journal of Resources and Ecology, 2017, 8(6):641-647.

[3] Xi Min, Zi Yuanyuan, Wang Qinggai, et al. Assessment of the content, structure, and source of soil dissolved organic matter in the coastal wetlands of Jiaozhou Bay, China[J]. Physics & Chemistry of the Earth, 2018, 103:35-44.

[4] 操庆. 盐分对土壤电化学、结构和生物学相关性质的影响[D]. 合肥:安徽农业大学,2015.

[5] 张娜,潘瑞瑞,周增辉,等. 充分湿润与淹水栽培对土壤养分与酶活性的影响[J]. 江西农业学报,2016,28(4):28-31.

[6] 张文,周广威,闵伟,等. 长期咸水滴灌对棉花产量、土壤理化性质和 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报,2014,33(8):1583-1590.

[7] 王维奇,王纯,仝川,等. 闽江河口区盐—淡水梯度下芦苇沼泽土壤有机碳特征[J]. 湿地科学,2012,10(2):164-169.

[8] Li Jianguo, Pu Lijie, Zhu Ming, et al. Evolution of soil properties following reclamation in coastal areas: A review[J]. Geoderma, 2014,226-227(1):130-139.

[9] Li Qifei, Xi Min, Wang Qinggai, et al. Characterization of soil salinization in typical estuarine area of the Jiaozhou Bay, China[J]. Physics & Chemistry of the Earth, 2018,103:51-61.

[10] Badiane N N Y, Chotte J L, Pate E, et al. Use of soil enzyme activities to monitor soil quality in natural and improved fallows in semi-arid tropical regions[J]. Applied Soil Ecology, 2001,18(3):229-238.

[11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.

[12] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社,1986.

[13] 王雅,刘爽,郭晋丽,等. 黄土高原不同植被类型对土壤养分、酶活性及微生物的影响[J]. 水土保持通报,2018,38(1):62-68.

[14] 于天仁,王振权. 土壤分析化学[M]. 北京:科学出版社,1988:192-262.

[15] 邵文静,宋垠先,王成,等. 近 30 年来苏南耕地土壤 pH 时空变化特征及影响因素分析[J]. 高校地质学报,2016,22(2):264-273.

[16] 程瑞梅,刘泽彬,肖文发,等. 三峡库区典型消落带土壤化学性质变化[J]. 林业科学,2017,53(2):19-25.

[17] 乔宇鑫,朱华忠,钟华平,等. 内蒙古地区草地表层土壤容重空间格局分析[J]. 草地学报,2016,24(4):793-801.

[18] 张余良,陆文龙,张伟,等. 长期微咸水灌溉对耕地土壤理化性状的影响[J]. 农业环境科学学报,2006,25(4):969-973.

[19] 单世平,黄军,刘前刚,等. 淹水条件对稻田土壤肥力及理化性质的影响研究进展[J]. 农学学报,2014,4(10):46-49.

[20] 齐兴国. 土壤氮素矿化与固定及其影响因素的研究[J]. 安徽农业科学,2014,42(21):7005-7006.

[21] 马朋,李昌晓,任庆水,等. 模拟水淹—干旱胁迫对水杉幼树实生土壤营养元素含量的影响[J]. 生态学报,2015,35(23):7763-7773.

[22] Brockett B F T, Prescott C E, Grayston S J. Soil moisture is the major factor influencing microbial community structure and enzyme activities across seven biogeoclimatic zones in western Canada[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2012,44(1):9-20.

[23] Wong V N L, Greene R S B, Dalal R C, et al. Soil carbon dynamics in saline and sodic soils:a review[J]. Soil Use & Management, 2010,26(1):2-11.

[24] 李建兵,黄冠华. NaCl 对粉壤土氨挥发及硝化、反硝化的影响[J]. 农业环境科学学报,2006,25(4):945-948.

[25] 冯棣,张俊鹏,孙池涛,等. 长期咸水灌溉对土壤理化性质和土壤酶活性的影响[J]. 水土保持学报,2014,28(3):171-176.

[26] 朱同彬,诸葛玉平,刘少军,等. 不同水肥条件对土壤酶活性的影响[J]. 山东农业科学,2008(3):74-78.

[27] 万忠梅,宋长春,郭跃东,等. 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[J]. 生态学报,2008,28(12):5980-5986.

[28] 田幼华,吕光辉,杨晓东,等. 水盐胁迫对干旱区植物根际土壤酶活性的影响[J]. 干旱区资源与环境,2012,26(3):156-163.

[29] 翟红梅,曹彩云,刘孟雨. 长期咸水灌溉对土壤酶活性及反应动力学的影响[J]. 干旱地区农业研究,2018,36(1):95-101.

[30] 崔东,邓霞,闫俊杰,等. 伊犁河谷不同土地利用方式对土壤养分与酶活性的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(2):371-374.