

## 盐生植物灌丛对土壤养分和盐分空间分布的影响及其机制研究进展

许婕, 陈永金\*, 刘加珍 (聊城大学环境与规划学院, 山东聊城 252059)

**摘要** 基于“肥岛”“盐岛/谷”的概念主要综述盐生植物灌丛下土壤养分、盐分含量的空间分布特征, 重点阐述盐生植物冠下土壤“肥岛”“盐岛/谷”形成的生物因素(植物物种、植物根系、植物生长状况、动物微生物活动)和非生物因素(离子的化学性质、地下水、气候、成土母质、土壤特性、地形地貌、外源性、含水量等), 最后对下一步研究做了展望。

**关键词** 盐渍化; 盐生植物; 养分; 盐分; 空间分布; 机制

中图分类号 S158 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2020)01-0019-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.01.005



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

### Research Progress of the Effects of Halophyte Shrubs on Spatial Distribution of Soil Nutrients and Salts and Their Mechanisms

XU Jie, CHEN Yong-jin, LIU Jia-zhen (School of Environment and Planning, Liaocheng University, Liaocheng, Shandong 252059)

**Abstract** Using halophytes to improve saline soil conforms to the construction concept of ecological civilization that respects nature, conforms to nature and protects nature. Based on the summary of "Fertility island" and "Salinity island/Valley", the spatial distribution characteristics of soil nutrient and salt content under halophyte shrubs were summarized. The biological and abiotic factors of the formation of "Fertility island" and "Salinity island/Valley" under canopy of halophytes were elaborated. The biological factors included plant species, plant root system, plant growth status, animal microbial activities, and the abiotic factors include chemical properties of ions, groundwater, climate, parent material of soil formation, soil properties, topography, exogenous, water content and so on. At the end of this paper, researching directions of this field in the future was prospected.

**Key words** Salinization; Halophyte; Nutrients; Salts; Spatial distribution; Mechanism

土壤盐渍化(soil salinization)是指土壤底层或地下水中的盐分在表层土壤中积累的现象或过程, 世界盐渍化面积达  $9.55 \times 10^8 \text{ hm}^2$ , 占全球土地总面积的 10%, 且以每年  $1.0 \times 10^6 \sim 1.5 \times 10^6 \text{ hm}^2$  的速度递增<sup>[1-2]</sup>。我国盐渍化土地面积 3 600 万  $\text{hm}^2$ , 占全国可利用土地面积的 4.88%<sup>[2-3]</sup>。盐渍化土地在我国主要分布于西北、华北、东北及沿海地区, 深受气候、地质、地形等多种因素的影响, 具有面积大、分布广、种类多以及动态变化的特点<sup>[4-7]</sup>。党的十九大提出了尊重自然、顺应自然和保护自然的生态文明建设理念, 利用盐生植物对盐渍化土壤治理改造是最经济、最生态也是最具可持续性的路径和方法。分析盐生植物对土壤盐分、养分空间分布的影响——“肥岛”“盐岛/谷”效应<sup>[8-13]</sup>, 研究盐生植物灌丛下“肥岛”“盐岛/谷”现象的形成机制<sup>[14-17]</sup>, 对盐渍化土地治理与合理开发利用具有积极意义<sup>[18-21]</sup>。

## 1 盐生植物灌丛下的“肥岛”与“盐岛/谷”效应

**1.1 “肥岛”效应** 很多研究表明, 盐生植物能促进其冠下土壤有机质含量的上升<sup>[22-28]</sup>, 而且有机质含量随土壤深度和与树干距离的增加呈下降变化<sup>[29]</sup>, 这种土壤养分资源在灌丛冠幅下的聚集的现象称为“肥岛”效应<sup>[30]</sup>。除了有机质, 盐生植物灌丛下土壤氮磷钾含量也表现出较明显的增加, 且主要集中在表层<sup>[31-32]</sup>。

植物物种不同, “肥岛”效应也有差异。在北疆荒漠区, 梭梭根部土壤有效磷、有效钾和碱解氮都表现出明显的富集

现象<sup>[10]</sup>; 雷金银等<sup>[14]</sup>研究发现怪柳种植后土壤速效磷、碱解氮含量增加, 速效钾基本不变; 在黄河三角洲, 白刺林下土壤有效氮、有效磷含量比周围土壤高, 速效钾含量略低<sup>[16]</sup>; 黄土高原西部荒漠区的红砂灌丛下土壤有机碳、全效养分、速效养分都表现出富集效应<sup>[33]</sup>。盐生植物冠下“肥岛”效应也表现出不同养分指标之间的差异性, 一般盐生植物的“肥岛”效应主要表现在有机质和氮、磷的富集上, 钾的富集效应不明显甚至出现比周围土壤低的特点<sup>[14, 16, 33-34]</sup>。

**1.2 “盐岛/谷”效应** 盐生植物灌丛下土壤盐分含量比周围土壤高<sup>[15, 33]</sup>, 这种现象称为“盐岛”效应。弋良朋等<sup>[17]</sup>研究发现, 盐碱地上种植芦苇后, 土壤中  $\text{Na}^+$  增加明显; 尹传华等<sup>[26]</sup>对塔克拉玛干沙漠的研究表明怪柳灌丛对  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  的富集效应明显; 而在黄土高原西部荒漠区, 红砂灌丛对土壤  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$  有明显的富集效应<sup>[33]</sup>。

与盐岛效应相反, 盐生植物种植后土壤的含盐量低于周围土壤的现象称为“盐谷”效应<sup>[11, 14, 23]</sup>。雷金银等<sup>[14]</sup>研究发现在生长于宁夏盐碱地上的怪柳主茎周围 0~15 cm 处形成低盐区,  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  的降低幅度大于  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ ; 李从娟等<sup>[9]</sup>对古尔班通古特沙漠梭梭的研究发现, 梭梭主根周围形成低盐、低 pH 的微环境; 赵春桃等<sup>[11]</sup>研究了天津滨海的盐生植物, 发现碱蓬、芦苇种植后能有效降低滨海盐土中的盐分含量。

## 2 “肥岛”和“盐岛/谷”形成机理

影响土壤养分、盐分分布的因素可分为生物因素和非生物因素。生物因素包括植物物种、植物根系、植物生长状况、动物微生物活动, 非生物因素包括离子的化学性质、地下水、季节气候(温度、湿度、风、降雨量)、成土母质、土壤特性、地形地貌、土壤含水率等。

### 2.1 生物因素

**2.1.1 植物物种** 植物物种是影响土壤养分和盐分分布以

**基金项目** 国家科技支撑计划项目(2014BAC15B02); 国家自然科学基金项目(40871239, 40901276); 国家创新训练项目(201910447022)。

**作者简介** 许婕(1995—), 女, 山东临沂人, 硕士研究生, 研究方向: 湿地碳氮循环。\*通信作者, 副教授, 博士, 硕士生导师, 从事生态环境保护研究。

**收稿日期** 2019-07-16

及循环的重要因素。在高盐分、低养分的干旱荒漠生态系统、退化草地生态系统乃至新生滨海湿地生态系统中只有耐盐、耐贫瘠的盐生植物才能生长。按照植物耐盐机理的不同可将盐生植物分为稀盐、泌盐和拒盐3种<sup>[35]</sup>。稀盐盐生植物和泌盐盐生植物可以吸收土壤中的盐分并储存在体内,实现盐分的转移,使其叶片含有较高的盐分。当植物枝叶枯萎时,以凋落物的形式回落到土壤中实现生物积盐。肉质化叶片的盐生植物相比其他更容易分解并向土壤释放养分盐分<sup>[36]</sup>;拒盐盐生植物则不吸收土壤中的盐分。弋良朋等<sup>[17]</sup>研究发现稀盐和泌盐植物根际的盐分富集率高于拒盐盐生植物,这可能与植物的生物积盐有关。柽柳作为泌盐盐生植物,可以从土壤中吸收大量盐分并通过盐腺排出体外<sup>[37]</sup>,其形态为多枝、半球状树冠,冠底紧贴地表,既有利于增强其荫蔽作用,通过植物蒸腾替代地面蒸发,减少表层土壤积盐<sup>[37-38]</sup>,又有利于捕获和保持凋落物,并通过树干径流将树冠截留细粒物质和植物叶子分泌物中的营养物质集中起来,从而获得较高的养分和盐分输入基茎周围土壤<sup>[9,30,39]</sup>。李从娟等<sup>[9]</sup>研究了古尔班通古特沙漠的梭梭,发现其树干中心出现“低盐”现象,这可能与梭梭树冠呈“Y”型,具有较强聚集雨水的功能,树干径流作用使凋落物远离树干,并且梭梭枝叶比较稀疏,凋落物容易被风搬运到其他地方,因此较强的雨水冲刷加上得不到凋落物盐分的补充使树干中心形成低盐区<sup>[37]</sup>。芦苇属于拒盐盐生植物,具有一定限制 $\text{Na}^+$ 从根部进入地上部分的能力,芦苇样地土壤含盐量与波动均较小<sup>[40]</sup>,湿地芦苇的植物再生能力且生物量大,表层积累大量枯枝落叶,腐殖化作用明显,营养元素易于积累<sup>[41]</sup>。也有研究发现盐生草本植物根际盐分降低趋势较盐生灌木明显<sup>[42]</sup>,耐盐能力越强的盐生植物,根际盐分富集程度也更大<sup>[17]</sup>。

**2.1.2 植物根系。**在逆境中生活的植物会将生物量集中在地下根部,所以发达的根系是盐生植物对盐渍化土壤进行改良的重要器官<sup>[14]</sup>,这主要通过根的生理特性、根际微环境、离子的选择性吸收以及根系的物理穿插作用实现的。

(1)生理特性。根系总长度、根系表面积、体积等形态学参数是决定根系养分盐分吸收范围、吸收强度的重要指标<sup>[43-45]</sup>。浅根型植物主要利用表层土壤的降水,深根型植物主要利用较深层土壤中的降水或地下水<sup>[46]</sup>。生物量在根系的分配模式影响植物对养分盐分的吸收量<sup>[44,47-48]</sup>。生长在滨海湿地环境的芦苇根系主要分布在土层的0~20 cm处并且可以横向产生根孽根,柽柳、碱蓬地下根系不发达<sup>[49]</sup>,主要分布在土壤0~30 cm深度<sup>[36,50]</sup>,随土壤深度增加,根系明显减少<sup>[36,49]</sup>。与此相反,主要生活在荒漠地带的梭梭,根系则较发达,而且分布到很深的地下以获取水分<sup>[51]</sup>。靖淑慧等<sup>[52]</sup>研究黄河三角洲滨海湿地不同盐生植物群落发现,碱蓬土壤表层速效磷含量最多,而芦苇最少,这可能与芦苇根系在表层分布比例大且生物量多有关。植物根系径级较大的根系主要承担支撑、运输和贮藏等功能,径级较小的细根主要承担吸收功能<sup>[44]</sup>。

(2)根分泌物。根分泌物及根部组织脱落物可以改善根际土壤结构,增加根际土壤的养分水平<sup>[32]</sup>。根分泌物增加土粒与根系的接触程度,根系的呼吸作用和根系分泌物造成的酸性环境可以大大提高根际土壤中难溶性养分的溶解度<sup>[53]</sup>,并且根际微环境所发生的变化对土壤全态养分的活化也有一定作用<sup>[17]</sup>,从而提高养分的有效性<sup>[54]</sup>。多年生根系及其代谢活动,可以加速土壤 $\text{CaCO}_3$ 的溶解,释放的 $\text{Ca}^{2+}$ 替代 $\text{Na}^+$ ,促进 $\text{Na}^+$ 等盐分离子淋洗,降低盐分含量<sup>[55]</sup>。

(3)选择性吸收。植物根系对盐分的选择性吸收与离子运输速率的不同会导致盐分的区划特征<sup>[56-57]</sup>,当离子迁移至根表的速度慢于根系吸收的速率时表现为离子亏缺,而当离子向根表迁移的速度快于根系的吸收速率时则表现为离子富集<sup>[42]</sup>。碱蓬根系对于 $\text{K}^+$ 有较强的吸收能力,使得 $\text{K}^+$ 向表层富集<sup>[17]</sup>。柽柳为泌盐性植物,对 $\text{Na}^+$ 进行选择吸收<sup>[15,58]</sup>。芦苇属于拒盐盐生植物,选择性吸收 $\text{K}^+$ ,对 $\text{Na}^+$ 具有一定的限制能力<sup>[40,59-60]</sup>。盐胁迫下新疆杨通过选择性吸收 $\text{K}^+$ ,对 $\text{Na}^+$ 具有较强的截留作用,对 $\text{Cl}^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 也有一定的截留作用<sup>[61]</sup>。韩文君等<sup>[57]</sup>对内蒙古多种盐生植物研究发现 $\text{Ca}^{2+}$ 多集中于根部,这也反映了盐生植物对离子的选择性吸收。

另外,植物根系的穿插作用形成“优先路径”,提高土壤通透性,从而加速水流速度对盐分的淋洗作用<sup>[14,40,62]</sup>。

**2.1.3 植物生长状况。**土壤中养分和盐分的变化受植株生长状况的影响<sup>[10,40,42,61,63-64]</sup>。在植物生长旺盛时,盐分吸收大于归还,土壤呈脱盐趋势;随着树龄增长、生长势的衰弱,盐分的归还大于吸收,土壤盐分在冠下积聚<sup>[42,57,65]</sup>。植物的吸收利用程度影响灌下土壤养分和盐分含量的变化,植物体内养分和盐分含量的变化也可以在一定程度上反映出不同生长状况下植物的吸收利用能力。有关梭梭的研究表明,枝条中的盐分含量随树龄增加而不断累积,同一树龄盐含量从大到小依次是多年生枝、2年生枝、同化枝;养分含量随种植年限不断增加呈现出不同的变化趋势,其中养分氮素、钾素随梭梭树龄增大而减小,磷素含量随树龄增大而增大,且同一树龄梭梭枝条中,氮素、钾素含量从大到小依次是同化枝、2年生枝条、多年生枝条,磷素含量与其相反<sup>[66]</sup>。与之相反,马云波等<sup>[67]</sup>研究发现随着林龄的增长,华北落叶松人工林林下土壤速效钾含量有逐渐下降的趋势,土壤速效磷含量有所增加。

基径、株高和冠幅的大小与植物根部土壤养分的富集率存在一定的相关关系<sup>[10]</sup>。灌丛高、冠幅大、生物量多,其盖度增加,既有利于减弱地面蒸发作用,又可以促进凋落物的积累,减弱风蚀作用,另一方面可以加强对土壤细粒物质的截获能力<sup>[30]</sup>。刘耘华等<sup>[10]</sup>研究了新疆荒漠的梭梭,发现基径、株高和冠幅的大小与植物根部土壤碱解氮的富集率呈正相关,与速效钾呈负相关,与有机质无明显相关关系;速效磷与基径呈正相关,与株高、冠幅无关。

植物生长状况还体现在通过改变外界微环境来影响土壤中的养分和盐分。随着植物的生长,灌下土壤中的生物多

样性和丰富度较裸地增加,微环境的变化影响土壤中养分和盐分的分布<sup>[64]</sup>。

**2.1.4 动物与微生物。**动物微生物活动影响盐生植物冠下土壤养分和盐分的含量,且主要作用于表层土壤<sup>[68]</sup>。动物在灌木附近觅食和休憩,其排泄物及其动植物残体可以加强植物冠下养分的富集,特别是对氮元素有影响<sup>[22,69-70]</sup>。动物的洞穴在一定程度上增加灌木下土壤的通透性和渗透性,可以促进盐分向下淋洗。土壤动物和微生物的活动也可吸收转化部分盐分<sup>[3]</sup>,土壤微生物加速有机质的分解,是土壤养分循环和物质转化的驱动者,尤其对碳、氮、磷等营养元素的循环转化具有重要意义<sup>[70-75]</sup>。微生物的代谢活动、生物固氮作用为植物提供更多的易吸收的营养物质<sup>[64,75-76]</sup>。

## 2.2 非生物因素

**2.2.1 离子的化学性质及相互作用。**与碳、氮等气体型元素的循环相比,磷素是一种迁移率很低的沉积性矿物,磷的循环相对较稳定和封闭,为非完全型循环,无气态迁移<sup>[77-80]</sup>。 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 与 $CO_3^{2-}$ 反应均产生沉淀,并使得它们在深度剖面上分布不均匀,但 $Ca(HCO_3)_2$ 的溶解度要好于 $CaCO_3$ ,而 $Mg(HCO_3)_2$ 和 $MgCO_3$ 的溶解度均很低,因此 $Ca^{2+}$ 在土壤溶液中的游离要高于 $Mg^{2+}$ <sup>[81]</sup>。

氯化物溶解度较高,硫酸盐类溶解度较小, $SO_4^{2-}$ 易与 $Ca^{2+}$ 结合,生成微溶于水的 $CaSO_4$ ,造成 $SO_4^{2-}$ 局部分布不均匀<sup>[82-83]</sup>。因此在易溶性盐类上行过程中,氯化物的表聚性最为强烈,硫酸盐次之<sup>[84]</sup>。在雨水淋溶过程中,氯化物首先遭到淋溶,硫酸盐类较氯化物的淋溶速率慢且在土壤表层相对富集<sup>[81]</sup>。例如,在黄河三角洲湿地柽柳冠下土壤中 $Cl^-/SO_4^{2-}$ 、 $Cl^-/HCO_3^-$ 随土层加深而升高,而 $SO_4^{2-}/HCO_3^-$ 不变<sup>[15]</sup>。

某些离子的大量积累会影响其他离子在土壤中的迁移和转化或导致某些养分的有效性降低<sup>[84]</sup>。 $Ca^{2+}$ 对磷有固定作用, $Ca^{2+}$ 的累积降低土壤磷的有效性<sup>[84]</sup>;  $Ca^{2+}$ 与 $Mg^{2+}$ 间存在离子拮抗现象, $Ca^{2+}$ 浓度过高会影响 $Mg^{2+}$ 的吸收<sup>[85]</sup>。Ca素营养对N、P吸收影响较小,而对 $K^+$ 的吸收则具有双重作用,适量Ca促进 $K^+$ 吸收,Ca浓度过高,会抑制根系生长,从而使 $K^+$ 吸收减少<sup>[85]</sup>。 $K^+$ 的累积对 $Mg^{2+}$ 的吸收, $Na^+$ 的累积对 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 的吸收都有一定的抑制作用,且 $Na^+$ 会增加土壤交换性钠水解作用,增加土壤碱性腐蚀作物根系,降低P等营养元素的溶解度<sup>[84]</sup>。 $Na^+$ 过多会影响植株对 $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 等离子的吸收<sup>[86]</sup>。低盐量下,根优先吸收 $K^+$ ,不受 $Na^+$ 的抑制,而 $K^+$ 却总抑制 $Na^+$ 的吸收;高盐量下,离子的选择性吸收性能差, $Na^+$ 对 $K^+$ 的抑制大于 $K^+$ 对 $Na^+$ 的抑制<sup>[86]</sup>,表现出 $Na^+$ 和 $K^+$ 间的拮抗作用<sup>[57]</sup>。 $Cl^-$ 与 $SO_4^{2-}$ 吸收过多,也可降低对 $HPO_4^{2-}$ 的吸收<sup>[86]</sup>。 $Cl^-$ 对 $NO_3^-$ 的吸收也有一定的抑制作用<sup>[84]</sup>。

**2.2.2 地下水及矿化度。**在强烈蒸发条件下,地下水中的盐分随毛管水上升至地表,水分蒸发后盐分滞留在土壤中,造成土壤积盐<sup>[87]</sup>,地下水位与土壤表层盐分含量呈极显著相关<sup>[31,45]</sup>。土壤盐分含量还受地下水矿化度的影响<sup>[84,88]</sup>,土

壤含盐量最高值出现在地下水埋深小、矿化度大的区域<sup>[84]</sup>。也有研究发现并不是地下水位越高土壤含盐量越高<sup>[69]</sup>,如滨海湿地的降雨集中季节,地下水位不断抬升,土壤盐分含量却呈下降变化,这是由于降雨对盐分起到了淋洗作用<sup>[87]</sup>。因此,分析土壤盐分含量变化与地下水位关系时,还要考虑降雨因素、降雨强度、蒸发量与降水量的关系等<sup>[34]</sup>。地下水通过影响土壤水分状况间接影响土壤有机质的含量<sup>[89]</sup>。

**2.2.3 气候特征。**春秋干旱,地面蒸发作用强烈促进土壤积盐,夏季多雨可促进土壤脱盐,冬季土层冻结较为稳定,冻结过程中,底层水盐不断向冻层运输并积累,春季气温回升时,蒸腾强烈,使得冻层中的盐分向地表聚集<sup>[90-92]</sup>。在气候干旱的地区,蒸降比大,有利于盐分在土壤表层聚集;在湿润多雨的地区,积盐、脱盐在一年内具有反复性,且盐分运移与降水有时滞性<sup>[93]</sup>。

土壤养分的动态变化与季节密切相关<sup>[94]</sup>,温度、降水量、湿度以及风向都会对养分分布产生影响。秋季总有机碳、溶解性有机碳含量最高,夏季最少<sup>[26]</sup>,凋落物分解可增加土壤肥力,而凋落物的分解速率受温度、降水量和湿度的影响<sup>[95]</sup>。刘亚琦等<sup>[22]</sup>研究黄河三角洲湿地的柽柳灌丛发现,在灌丛南面有机质含量高,这与南面日照充足、温度高有利于凋落物分解有关。刘耘华等<sup>[10]</sup>研究北疆荒漠梭梭发现,研究区内盛行的西北风向使冠幅内南部出现小的岛状结构。

**2.2.4 成土母质。**成土母质是土壤形成的基础,也是土壤氮、磷、钾等营养元素的主要来源<sup>[96]</sup>,且不同成土母质元素含量不同<sup>[97-98]</sup>,所以成土母质的不同也是土壤养分和盐分状况存在差异的原因之一。李军等<sup>[98]</sup>研究发现石灰岩母质和页岩母质发育的土壤各种养分含量均较高,这主要是其土壤质地较细、保肥能力相对较高;而花岗岩母质和砂岩母质发育的土壤,质地较粗,保肥能力相对较差,加上成土母质自身的养分含量低,因此其土壤养分含量相对较低。

杨真等<sup>[7]</sup>研究发现新疆某些山带分布有大量岩盐、石膏,风化侵蚀后使该地区土壤母质中普遍含盐。靖淑慧等<sup>[52]</sup>研究了黄河三角洲湿地不同盐生植物群落下全磷含量的变化,发现不同群落0~5 cm全磷含量差异较小,这与该区域内的成土母质基本一致有关<sup>[49]</sup>。所以较大区域尺度上成土母质的差异对土壤养分空间变化有较大影响,而在小区域内成土母质基本一致<sup>[99-100]</sup>。

**2.2.5 土壤特性。**土壤机械组成或土壤质地决定了土壤的孔隙状况和结构类型,进而影响养分和盐分在土壤中的迁移、分布和利用效率<sup>[40,101-102]</sup>。较大的土壤容重降低了土壤孔隙度和氧气含量,导致土壤微生物、有机质等含量减少,毛管作用强烈,使土壤盐含量明显上升<sup>[69,103]</sup>。壤质土毛管孔隙多且孔径大小适中,有利于水分运动,壤质土比砂质土和黏质土易于积盐<sup>[40]</sup>。土壤质地更细,其对阳离子的吸附能力更强<sup>[67]</sup>。

**2.2.6 地形地貌。**许多研究发现,地形、地貌、微地形变化等因素影响土壤的水热状况,决定着土壤质地,并且对地下

水的状况、地面蒸发强弱及土壤发育均有影响,进而影响着土壤养分和盐分的分配情况<sup>[104-107]</sup>。坡度低土壤发育程度较高,地下水埋藏浅,矿化度高,养分和盐分含量较高<sup>[51,108]</sup>;坡顶坡面风蚀作用强,陡坡雨水冲刷作用强烈养分容易流失,但对于由岩石组成的山地丘陵来说,阳坡有利于岩石风化,释放养分<sup>[21]</sup>。对于盐分含量与地形高度的关系有2种不同的观点,一种认为在强烈的风蚀作用下,坡顶土壤毛管孔隙度较大,土壤毛管上升作用小,土壤不易积盐,含盐量随海拔升高而降低<sup>[51,81,104]</sup>;另一种观点认为地势高的地区蒸发作用强烈,深层土壤及地下水中的可溶性盐类借助毛细管作用上升,积聚于土壤表层,从而使土壤盐分增加<sup>[109]</sup>。但这2种观点并不矛盾,前者从整体上进行分析,后者则进行了局部分析,但整体上土壤是积盐的,只是积盐程度不同。

**2.2.7 物质输入与输出。**外源性输入与输出对土壤中养分和盐分的含量分布存在一定的影响。在潮汐作用影响下,海水中的藻类、动植物残体会滞留在土壤表层,使滨海湿地土壤养分含量增加<sup>[36]</sup>。降雨也会输入营养元素并且输入量随时间和地点变化,例如我国半干旱温带地区降水中氮素的输入量小于亚热带地区降水中氮素的输入量<sup>[80]</sup>。大气沉降、上游河流、地表径流输入、人类生产生活排污施肥以及生物固氮等都会增加土壤养分和盐分含量<sup>[110-112]</sup>。气体挥发,养分和盐分淋失、流失,反硝化作用则会降低土壤养分和盐分含量<sup>[80,113-114]</sup>。

**2.2.8 土壤含水率。**土壤含盐量与土壤含水率密切相关<sup>[69]</sup>,易溶性离子随水而动<sup>[83]</sup>,水分的运移影响盐分的分布。土壤的干湿交替会影响钾、氮、磷的转化和运移<sup>[115-116]</sup>,显著降低土壤 DOC 含量,还可以刺激微生物活性<sup>[117]</sup>,如果适宜湿度且通气状况良好,土壤中的好气微生物活动旺盛,有机质分解速度快,湿度过大,水分堵塞了土壤孔隙,使通气状况受阻,嫌气微生物活动旺盛,有机质分解慢且不彻底<sup>[118]</sup>。干湿交替的频率和周期对养分和盐分的含量也有影响,李梦寻等<sup>[119]</sup>研究发现,随着干湿交替频率的增加,速效钾含量先降低后增加,硝态氮含量增加。姚新春等<sup>[120]</sup>研究发现,干湿交替间隔周期越长,土壤全 P 和有机质含量的下降量越大,土壤速效 K 和速效 P 含量的下降量越小。

### 3 结论与展望

综上所述,树冠捕获,凋落物、根系脱落物分解,树干径流以及动物微生物在灌木周围的生命活动可促进盐生植物灌下“肥岛”效应的形成。高温干旱,凋落物归还,雨水对植物的冲刷作用,地面蒸发引起的地下水上升,地势低平土壤孔隙度小有利于盐分在灌下聚集,形成“盐岛”效应。生长旺盛植物的较强吸收作用将大量盐分存储体内、植物荫蔽、发达根系的穿插作用、较强的树干径流作用以及孔隙度较大的土质有助于土壤脱盐,从而形成“盐谷”。但对盐生植物种植后冠下土壤盐分含量是升高还是降低存在争议,灌丛下的“盐谷”,“盐岛”效应可能与研究区域、物种不同有关,但对于同一研究区同一物种的不同观点,可以结合研究的季节及生物的生长发育程度等因素,从动态的角度进行进一步的

探讨。

速效养分对植物的生长有着最为直接的影响,土壤速效养分的变化较为复杂,目前许多对速效养分的研究有着不同的结果,加大盐生植物与土壤速效养分循环及其影响机制的研究是盐渍化土壤改良和生态保护研究的一个方向。

不同种植年限、不同生长势植物体内、植物不同部位的养分和盐分含量不同,植物体的养分和盐分含量可以反映生境土壤的盐碱程度和养分水平,但目前对某一植物体内、植物体不同部位养分盐分含量与土壤养分盐分含量的关系以及不同生长年限、生长势的关系进行系统的研究还鲜见报道,是一个值得深入研究的方向之一。

### 参考文献

- [1] 赵可夫,李法曾,张福锁. 中国盐生植物[M]. 2版. 北京:科学出版社,2013.
- [2] 王佳丽,黄贤金,钟太洋,等. 盐碱地可持续利用研究综述[J]. 地理学报,2011,66(5):673-684.
- [3] SUMNER M E, NAIDU R. Sodid soils: Distribution, properties, management and environmental consequences[M]. New York: Oxford University Press, 1998.
- [4] 王遵亲. 中国盐渍土[M]. 北京:科学出版社,1993.
- [5] 刘永信,王玉珍. 利用耐盐植物发展盐碱地高效生产的研究[J]. 宁夏农林科技,2011,52(3):9-10.
- [6] 刘永信,王玉珍. 黄河三角洲滩涂耐盐植物区域化栽培技术[J]. 山东农业科学,2011,43(8):115-117.
- [7] 杨真,王宝山. 中国盐渍土资源现状及改良利用对策[J]. 山东农业科学,2015,47(4):125-130.
- [8] 张立华,陈小兵. 盐碱地柽柳“盐岛”和“肥岛”效应及其碳氮磷生态学计量学特征[J]. 应用生态学报,2015,26(3):653-658.
- [9] 李从娟,雷加强,徐新文,等. 树干径流对梭梭“肥岛”和“盐岛”效应的作用机制[J]. 生态学报,2012,32(15):4819-4826.
- [10] 刘斌华,杨玉玲,盛建东,等. 北疆荒漠植被梭梭立地土壤养分“肥岛”特征研究[J]. 土壤学报,2010,47(3):545-554.
- [11] 赵春桃,弋良朋. 天津滨海主要盐生植物根际土壤特征研究[J]. 天津农业科学,2012,18(4):53-57.
- [12] OHRTMAN M K, SHER A A, LAIR K D. Quantifying soil salinity in areas invaded by *Tamarix* spp. [J]. Journal of arid environments, 2012, 85(10):114-121.
- [13] STOCK W D, DLAMINIL T S, COWLING R M. Plant induced fertile island possible indicators of desertification in a succulent desert ecosystem in northern Namaqualand, South Africa [J]. Plant ecology, 1999, 142(1/2):161-167.
- [14] 雷金银,班乃荣,张永宏,等. 柽柳对盐碱土养分与盐分的影响及其区化特征[J]. 水土保持通报,2011,31(2):73-76.
- [15] 张立华,陈沛海,李健,等. 黄河三角洲柽柳植株周围土壤盐分离子的分布[J]. 生态学报,2016,36(18):5741-5749.
- [16] 郝金标,邢尚军,宋玉民,等. 黄河三角洲不同造林模式下土壤盐分和养分的变化特征[J]. 林业科学,2007,43(S1):33-38.
- [17] 弋良朋,马健,李彦. 荒漠盐生植物根际土壤盐分和养分特征[J]. 生态学报,2007,27(9):3565-3571.
- [18] 王娜娜,齐伟,王丹,等. 基于样带的滨海盐碱地土壤养分和盐分的空间变异[J]. 应用生态学报,2012,23(6):1527-1532.
- [19] 张亚亚,郭颖,刘海红,等. 青藏高原表土有机碳、全氮含量分布及其影响因素[J]. 生态环境学报,2018,27(5):866-872.
- [20] 李昱君,濮劭杰. 土壤盐分分布影响因素研究综述[J]. 安徽农业科学,2018,46(14):19-20,26.
- [21] 秦松,樊燕,刘洪斌,等. 地形因子与土壤养分空间分布的相关性研究[J]. 水土保持研究,2008,15(1):46-49,52.
- [22] 刘亚琦,刘加珍,陈永金,等. 黄河三角洲湿地柽柳灌丛周围有机质富集及水分运动研究[J]. 南水北调与水利科技,2017,15(1):113-120.
- [23] 张立宾,宋曰荣,吴震. 柽柳的耐盐能力及其对滨海盐渍土的改良效果研究[J]. 安徽农业科学,2008,36(13):5424-5426.
- [24] 王玉珍,刘永信,魏春兰,等. 6种盐生植物对盐碱地土壤改良情况的研究[J]. 安徽农业科学,2006,34(5):951-952,957.
- [25] 于雷,潘文利,郑景明,等. 柽柳防护林对海堤重盐土改良作用的研究[J]. 辽宁林业科技,1998(3):34-37.

- [26] 尹传华,冯固,田长彦,等. 干旱区柽柳灌丛下土壤有机质、盐分的富集效应研究[J]. 中国生态农业学报,2008,16(1):263-265.
- [27] 张建锋,张德顺,陈光才,等. 上海滨海滩涂盐生植物分布及其生物量调查研究[J]. 江西农业学报,2015,27(2):26-29,36.
- [28] 张立宾,徐化凌,赵庚星. 碱蓬的耐盐能力及其对滨海盐渍土的改良效果[J]. 土壤,2007,39(2):310-313.
- [29] 何秀平,王保栋,谢琳萍. 柽柳对盐碱地生态环境的影响[J]. 海洋科学,2014,38(1):96-101.
- [30] 裴世芳,傅华,陈亚明,等. 放牧和围封下霸王灌丛对土壤肥力的影响[J]. 中国沙漠,2004,24(6):763-767.
- [31] 王勇辉,蒋海,海米提·依米提. 艾比湖桦栎生土壤特征分析[J]. 水土保持研究,2014,21(5):244-248.
- [32] 苏永中,赵哈林,张铜会. 几种灌木、半灌木对沙地土壤肥力影响机制的研究[J]. 应用生态学报,2002,13(7):803-806.
- [33] 何玉惠,刘新平,谢忠奎. 红砂灌丛对土壤盐分和养分的富集作用[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(3):115-119.
- [34] 周建,李刚,钦佩. 种植条件下海滨盐土理化性状和生物学特征[J]. 应用生态学报,2011,22(4):966-971.
- [35] 赵可夫. 盐生植物[J]. 植物学通报,1997,14(4):1-12.
- [36] 于家宝,陈小兵,孙志高,等. 黄河三角洲新生滨海湿地土壤营养元素空间分布特征[J]. 环境科学学报,2010,30(4):855-861.
- [37] 李君,赵成义,朱宏,等. 柽柳(*Tamarix* spp.)和梭梭(*Haloxylon ammodendron*)的“肥岛”效应[J]. 生态学报,2007,27(12):5138-5147.
- [38] LINDBERG S E, LOVETT G M, RICHTER D D, et al. Atmospheric deposition and canopy interactions of major ions in a forest[J]. Science, 1986, 231(4734):141-145.
- [39] BOCHET E, RUBIO J L, POESEN J. Modified topsoil islands with in patchy Mediterranean vegetation in SE Spain[J]. Catena, 1999, 38(1):23-44.
- [40] 朱宏伟,夏军,曹国栋,等. 盐渍化弃耕地土壤盐分动态及其影响因素[J]. 土壤,2013,45(2):1339-1345.
- [41] 刘玉斌,韩美,刘延荣,等. 黄河三角洲土壤盐分养分空间分异规律研究[J]. 人民黄河,2018,40(2):76-80,87.
- [42] 郝金标,张福锁,陈阳,等. 盐生植物根冠区土壤盐分变化的初步研究[J]. 应用生态学报,2004,15(1):53-58.
- [43] 王树凤,胡韵雪,孙海菁,等. 盐胁迫对2种柽柳苗期生长和根系生长发育的影响[J]. 生态学报,2014,34(4):1021-1029.
- [44] BONSER A M, LYNCH J P, SNAPP S. Effect of phosphorus deficiency on growth angle of basal roots in *Phaseolus vulgaris* [J]. New phytologist, 1996, 132(2):281-288.
- [45] 葛广华,殷彩云,王家强,等. 塔里木河上游荒漠河岸林土壤水分分布规律研究[J]. 西北林学院学报,2016,31(6):7-12,18.
- [46] 弋良朋,王祖伟. 盐胁迫下3种滨海盐生植物的根系生长和分布[J]. 生态学报,2011,31(5):1195-1202.
- [47] RAGHOTHAMA K G. Phosphate acquisition[J]. Annual review of plant physiology and plant molecular biology, 1999, 50:665-693.
- [48] 王敬国. 植物营养的土壤化学[M]. 北京:北京农业大学出版社,1995.
- [49] 王岩,陈永金,刘加珍. 黄河三角洲湿地土壤养分空间分布特征[J]. 人民黄河,2013,35(2):72-74.
- [50] ROTHE A, BINKLEY D. Nutritional interactions in mixed species forests: A synthesis[J]. Canadian journal of forest research, 2001, 31(11):1855-1870.
- [51] 柴仲平,贾宏涛,程路明,等. 地形对梭梭立地条件的影响 I:坡位[J]. 新疆农业大学学报,2008,31(2):56-58.
- [52] 靖淑慧,刘加珍,陈永金,等. 滨海湿地不同群落对土壤磷的有效性影响研究[J]. 土壤通报,2018,49(2):392-401.
- [53] MARTENS R. Contribution of rhizodeposits to the maintenance and growth of soil microbial biomass[J]. Soil biology and biochemistry, 1990, 22(2):141-147.
- [54] 申建波,张福锁. 根分泌物的生态效应[J]. 中国农业科技导报,1999,1(4):21-27.
- [55] ZHAO C Y, WANG Y C, SONG Y D, et al. Biological drainage characteristics of alkalized desert soils in north-western China[J]. Journal of arid environment, 2004, 56(1):1-9.
- [56] 李加宏,俞仁培. 土壤-作物根际系统中离子的迁移[J]. 土壤学报,1998,35(2):186-194.
- [57] 韩文君,春亮. 内蒙古12种盐生植物对几种无机离子的吸收及分配特性[J]. 草原与草坪,2013,33(3):16-20.
- [58] 张鸣,张力,石晓妮,等. 民勤绿洲盐生草生境土壤盐分特征及离子组成[J]. 水土保持通报,2014,34(6):231-235.
- [59] MATOH T, MATSUSHITA N, TAKAHASHI E. Salt tolerance of the reed plant *Phragmites communis* [J]. Physiol plantarum, 1988, 72(11):8-14.
- [60] MATSUSHITA N, MATOH T. Characterization of Na<sup>+</sup> exclusion mechanism of salt-tolerant reed plants in comparison with salt sensitive rice plants[J]. Physiol Plantarum, 2006, 83(1):170-176.
- [61] 刘静,冯长青,金娟,等. 新疆杨对盐分离子吸收选择性和运输选择性的研究[J]. 干旱区资源与环境,2007,21(11):118-122.
- [62] 程金花,张洪江,史玉虎. 三峡库区花岗岩林地土壤特性与“优先路径”的关系[J]. 中国水土保持科学,2005,3(1):97-101.
- [63] 王美美,邓婉琴,梁玉祥. 不同天气界面处理方式与湿度条件对土壤中速效磷迁移规律的影响[J]. 现代农业科技,2017(13):200-201.
- [64] 刘菊梅,曹博,石春芳,等. 紫花苜蓿根际效应对河套灌区土壤盐分和养分的影响[J]. 南方农业学报,2018,49(2):246-252.
- [65] 雍艳华,张霞,王绍明,等. 新疆典型盐生植物营养器官盐分积累与生态化学计量特征[J]. 植物生态学报,2016,40(12):1267-1275.
- [66] 王泽,阿不都克玉木·米吉提,吐尔逊娜依·热依木,等. 北疆荒漠区梭梭水分、盐分和养分状况研究[J]. 新疆农业大学学报,2014,37(4):339-344.
- [67] 马云波,许中旗,张岩,等. 冀北山区华北落叶松人工林对土壤化学性质的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(4):165-170.
- [68] 薛立,邢立刚,陈红跃,等. 不同林分土壤养分、微生物与酶活性的研究[J]. 土壤学报,2003,40(2):280-285.
- [69] 夏江宝,赵西梅,刘俊华,等. 黄河三角洲莱州湾湿地柽柳种群分布特征及其影响因素[J]. 生态学报,2016,36(15):4801-4808.
- [70] TITUS J H, NOWAK R S, SMITH S D. Soil resource heterogeneity in the Mojave Desert[J]. Journal of arid environments, 2002, 52(3):269-292.
- [71] 蒋婧,宋明华. 植物与土壤微生物在调控生态系统养分循环中的作用[J]. 植物生态学报,2010,34(8):979-988.
- [72] PORAZINSKA D L, BARDGETT R D, BLAAUW M B, et al. Relationships at the aboveground-belowground interface: Plants, soil biota, and soil processes[J]. Ecological monographs, 2003, 73(3):377-395.
- [73] 贺纪正,张丽梅. 氢氧化微生物生态学与氮循环研究进展[J]. 生态学报,2009,29(1):406-415.
- [74] SUGIHARA S, SHIBATA M, MVONDO ZE A D, et al. Effects of vegetation on soil microbial C, N, and P dynamics in a tropical forest and savanna of Central Africa[J]. Applied soil ecology, 2015, 87(3):91-98.
- [75] MARTENS R. Contribution of rhizodeposits to the maintenance and growth of soil microbial biomass[J]. Soil biology and biochemistry, 1990, 22(2):141-147.
- [76] 赵如金,李潜,吴春笃,等. 北固山湿地土壤氮磷的空间分布特征[J]. 生态环境,2008,17(1):273-277.
- [77] 尹凌霄,华路,张振贤,等. 土壤中磷素的有效性及其循环转化机制研究[J]. 首都师范大学学报(自然科学版),2005,26(3):95-101.
- [78] 张明如,德永军,李玉灵,等. 森林生态学[M]. 呼和浩特:内蒙古大学出版社,2006.
- [79] 张春霞,郝明德,王旭刚,等. 黄土高原沟壑区小流域土壤养分分布特征[J]. 水土保持研究,2003,10(1):78-80.
- [80] 张小川,蔡蔚祺,徐琪. 草地土壤-植被系统的生产力及其营养物质循环[J]. 土壤学进展,1989(6):8-16.
- [81] 张芳,熊黑钢,田源,等. 区域尺度地形因素对奇台绿洲土壤盐渍化空间分布的影响[J]. 环境科学研究,2011,24(7):731-739.
- [82] 戴树桂. 环境化学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [83] 张天举,陈永金,刘加珍. 黄河三角洲湿地不同植物群落土壤盐分分布特征[J]. 浙江农业学报,2018,30(11):1915-1924.
- [84] 麦麦提吐尔逊·艾则孜,米热古丽·艾尼瓦尔,古丽孜巴·艾尼瓦尔,等. 伊犁绿洲土壤盐渍化与浅层地下水化学特征分析[J]. 干旱地区农业研究,2015,33(5):193-200,257.
- [85] 范双喜,伊东正. 钙素对叶用莴苣营养吸收和生长发育的影响[J]. 园艺学报,2002,29(2):149-152.
- [86] 郭文忠,刘声锋,李丁仁,等. 设施蔬菜土壤次生盐渍化发生机理的研究现状与展望[J]. 土壤,2004,36(1):25-29.
- [87] 吕真真,杨劲松,刘广明,等. 黄河三角洲土壤盐渍化与地下水特征关系研究[J]. 土壤学报,2017,54(6):1377-1385.
- [88] 祖皮艳木·买买提,海米提·依米提,麦麦提吐尔逊·艾则孜. 伊犁河谷地下水及土壤盐分分布特征[J]. 干旱地区农业研究,2011,29(1):58-63.
- [89] 易亚男,尹力初,张蕾. 不同地下水位和施肥管理对水稻土有机质及氧化铁含量的影响[J]. 湖南农业科学,2013(21):38-40.
- [90] 王艳,廉晓娟,张余良,等. 天津滨海盐渍土水盐运动规律研究[J]. 天津农业科学,2012,18(2):95-97,101.



- [12] BACZYK A, WAGNER M, OKRUSZKO T, et al. Influence of technical maintenance measures on ecological status of agricultural lowland rivers-Systematic review and implications for river management[J]. Science of the total environment, 2018, 627: 189-199.
- [13] MOORE M, LOCKE M A, JENKINS M, et al. Dredging effects on selected nutrient concentrations and enzymatic activity in two drainage ditch sediments in the lower Mississippi River Valley[J]. International soil and water conservation research, 2017, 5(3): 190-195.
- [14] SHIGAKI F, KLEINMAN P J A, SCHMIDT J P, et al. Impact of dredging on phosphorus transport in agricultural drainage ditches of the Atlantic Coastal Plain[J]. Journal of the American water resources association, 2008, 44(6): 1500-1511.
- [15] SMITH D R, WARNEMUENDE E A, HAGGARD B E, et al. Dredging of drainage ditches increases short-term transport of soluble phosphorus[J]. Journal of environmental quality, 2006, 35(2): 611-616.
- [16] SMITH D R, PAPPAS E A. Effect of ditch dredging on the fate of nutrients in deep drainage ditches of the Midwestern United States[J]. Journal of soil and water conservation, 2007, 62(4): 252-261.
- [17] WANG C H, YUAN N N, PEI Y S, et al. Aging of aluminum/iron-based drinking water treatment residuals in lake water and their association with phosphorus immobilization capability[J]. Journal of environmental management, 2015, 159: 178-185.
- [18] 孙井梅, 刘晶晶, 史文霞, 等. 扰动强化污染底泥有机物自净的研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(7): 1315-1318.
- [19] 韩沙沙, 温琰茂. 富营养化水体沉积物中磷的释放及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2004, 23(2): 98-101.
- [20] 李一平, 逢勇, 吕俊, 等. 水动力条件下底泥中氮磷释放通量[J]. 湖泊科学, 2004, 16(4): 318-324.
- [21] 范成新, 周易勇, 吴庆龙. 湖泊沉积物界面过程与效应[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [22] XIA X H, YANG Z F, ZHANG X Q. Effect of suspended-sediment concentration on nitrification in river water: Importance of suspended sediment-water interface[J]. Environmental science & technology, 2009, 43(10): 3681-3687.
- [23] JING L D, WU C X, LIU J T, et al. The effects of dredging on nitrogen balance in sediment-water microcosms and implications to dredging projects[J]. Ecological engineering, 2013, 52: 167-174.
- [24] VENTERINK H O, HUMMELINK E, VAN DEN HOORN M W. Denitrification potential of a river floodplain during flooding with nitrate-rich water: Grasslands versus reedbeds[J]. Biogeochemistry, 2003, 65(2): 233-244.
- [25] CHEN M S, CUI J Z, LIN J, et al. Successful control of internal phosphorus loading after sediment dredging for 6 years: A field assessment using high-resolution sampling techniques[J]. Science of the total environment, 2018, 616/617: 927-936.
- [26] REDDY K R, FISHER M M, WANG Y, et al. Potential effects of sediment dredging on internal phosphorus loading in a shallow, subtropical lake[J]. Lake and reservoir management, 2007, 23(1): 27-38.
- [27] ZHONG J C, YOU B S, FAN C X, et al. Influence of sediment dredging on chemical forms and release of phosphorus[J]. Pedosphere, 2008, 18(1): 34-44.
- [28] 毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 等. 太湖东部不同类型湖区底泥疏浚的生态效应[J]. 湖泊科学, 2014, 26(3): 385-392.
- [29] BEUTEL M W. Inhibition of ammonia release from anoxic profundal sediments in lakes using hypolimnetic oxygenation[J]. Ecological engineering, 2006, 28(3): 271-279.

(上接第 23 页)

- [91] 张蛟, 崔士友, 冯芝祥, 等. 气候因子和地表覆盖对沿海滩涂土壤盐分动态的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(2): 294-302.
- [92] 方生, 陈秀玲. 华北平原大气降水对土壤林洗脱盐的影响[J]. 土壤学报, 2005, 42(5): 730-736.
- [93] 李晓军, 李取生. 松嫩平原西部不同土地覆被水盐动态对比研究[J]. 生态环境, 2005, 14(3): 399-404.
- [94] 邱尔发, 陈卓梅, 郑郁善, 等. 麻竹山地笋用林凋落物发生、分解及养分归还动态[J]. 应用生态学报, 2005, 16(5): 811-814.
- [95] 葛留威, 吕瑞恒, 李荔, 等. 盐生环境下 3 种荒漠植物叶凋落物分解动态特征[J]. 东北林业大学学报, 2016, 44(5): 39-43.
- [96] 高林, 董建新, 武可峰, 等. 土壤类型对烟草生长发育的影响研究进展[J]. 中国烟草科学, 2012, 33(1): 98-101.
- [97] 简中华, 徐明星, 宋明义, 等. 不同成土母质对浦江桃形李品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(10): 4356-4361.
- [98] 李军, 梁洪波, 宛祥. 烟田土壤养分状况及其与成土母质的关系研究[J]. 中国烟草科学, 2013, 34(3): 21-25.
- [99] 白军红, 李晓文, 崔保山, 等. 湿地土壤氮素研究概述[J]. 土壤, 2006, 38(2): 143-147.
- [100] 毛志刚, 王国祥, 刘金娥, 等. 盐城海滨湿地盐沼植被对土壤碳氮分布特征的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(2): 293-297.
- [101] 张世文, 王胜涛, 刘娜, 等. 土壤质地空间预测方法比较[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 332-339.
- [102] 庞凤, 李廷轩, 王永东, 等. 土壤速效氮、磷、钾含量空间变异特征及其影响因子[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 114-120.
- [103] 赵学春, 来利明, 朱林海, 等. 三工河流域琵琶柴群落特征与土壤因子的相关分析[J]. 生态学报, 2014, 34(4): 878-889.
- [104] 周在明, 赵淑惠. 华北半干旱平原区表层土壤盐分累积的影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2015, 38(5): 976-984.
- [105] HATTAR B I, TAIMEH A Y, ZIADAT F M. Variation in soil chemical properties along toposequences in an arid region of the Levant[J]. Catena, 2010, 83(1): 34-45.
- [106] PAL D K, SRIVASTAVA P, DURGE S L, et al. Role of microtopography in the formation of sodic soils in the semi-arid part of the Indo-Gangetic Plains, India[J]. Catena, 2003, 51(1): 3-31.
- [107] 叶庆华, 刘高焕, 田国良, 等. 黄河三角洲土地利用时空复合变化图谱分析[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2004, 34(5): 461-474.
- [108] 宋创业, 刘高焕, 刘庆生, 等. 黄河三角洲植物群落分布格局及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2008, 27(12): 2042-2048.
- [109] 姚荣江, 杨劲松, 刘广明, 等. 黄河三角洲地区典型地块土壤盐分空间变异特征研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 61-66.
- [110] 陶宝先, 陈永金. 不同形态氮输入对湿地生态系统碳循环影响的研究进展[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1): 162-167.
- [111] 马欣欣, 王中良. 湿地氮循环过程及其研究进展[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(17): 9454-9458, 9488.
- [112] 申校, 李叙勇, 张汪寿. 水库磷收支及其调控措施研究进展[J]. 应用生态学报, 2014, 25(12): 3673-3682.
- [113] 汪旭明, 李亚兰, 林啸, 等. 湿地土壤反硝化作用及测定方法[J]. 亚热带资源与环境学报, 2017, 12(3): 50-60.
- [114] 赵光昕, 张晴雯, 刘杏认, 等. 农田土壤硝化反硝化作用及其对生物炭添加响应的研究进展[J]. 中国农业气象, 2018, 39(7): 442-452.
- [115] 张威, 张旭东, 何红波, 等. 干湿交替条件下土壤氮素转化及其影响研究进展[J]. 生态学杂志, 2010, 29(4): 783-789.
- [116] 耿玉辉, 吴景贵. 干湿交替作用对黑土养分淋失的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3): 26-29.
- [117] 王健波, 张燕卿, 严昌荣, 等. 干湿交替条件下土壤有机碳转化及影响机制研究进展[J]. 土壤通报, 2013, 44(4): 998-1004.
- [118] 伍光和, 王乃昂, 胡双熙, 等. 自然地理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [119] 李梦寻, 王冬梅, 任远, 等. 不同干湿交替频率对土壤速效养分、水溶性有机碳的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(5): 1542-1549.
- [120] 姚新春, 师尚礼. 寒区旱区间歇性干旱对接种根瘤菌苜蓿草地土壤养分动态的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(3): 454-462.