

黑河中游不同土地利用方式地面节肢动物对土壤盐渍化的响应*

刘继亮^{1,2} 李锋瑞^{1,2†} 牛瑞雪^{1,2} 刘七军^{1,2} 秦 彧^{1,2} 刘长安^{1,2}

(1 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所生态与农业研究室, 兰州 730000)

(2 中国生态系统研究网络临泽内陆河流域研究站, 兰州 730000)

摘要 在甘肃河西走廊黑河中游荒漠绿洲过渡区, 天然沙质草地被相继转变为农田和防风固沙人工林, 但目前尚缺乏不同土地利用/管理方式下地面节肢动物群落对土壤盐渍化响应的系统研究。以天然沙质草地转变的人工梭梭灌木林、人工杨树林、人工樟子松林和农田为研究对象, 以天然草地为对照, 基于5种研究样地表层土壤盐分及其组成和地面节肢动物群落的观测数据, 采用RDA (Redundancy analysis)排序分析等方法, 研究了不同土地利用/管理方式下地面节肢动物个体数量和类群丰富度对土壤盐分环境变化的响应机制。主要结果为: (1)土地利用变化与管理措施相互作用驱动了地面节肢动物群落的演变过程, 天然草地植被转变为人工林和农田20多年后, 显著降低了地面节肢动物群落数量而对类群丰富度无显著影响。(2)地面节肢动物群落的变化受土壤pH、Na⁺、Mg²⁺、Cl⁻离子的共同影响, 其中土壤pH、Na⁺和Mg²⁺离子对动物群落变化的贡献率最大, 是关键生态因子。(3)动物个体数量随土壤pH的增加而增加, 随Mg²⁺、Cl⁻离子浓度的增加而下降。研究表明, 土地利用变化引起的土壤盐分环境改变是驱动地面节肢动物群落演变的重要因素之一。

关键词 黑河流域; 土地利用变化; 管理扰动; 土壤盐渍化; 地面节肢动物; 多变量分析

中图分类号 S154

文献标识码 A

我国内陆河流域集中分布在西北干旱区, 涉及新疆、甘肃、青海和内蒙古等省区, 总面积约占国土陆地面积的1/3。黑河流域是西北干旱区第二大内陆河流域^[1], 总面积约 $1.3 \times 10^5 \text{ km}^2$, 是能够全面反映干旱区内陆河流域自然生态景观特征的一个代表性流域^[2]。在黑河流域, 山地、绿洲、荒漠三大自然景观共存是其最基本的景观格局特征, 在这一景观格局下, 上游山区是冰川积雪源地, 是水资源的形成区, 中下游绿洲是水资源的主要消耗区。在黑河中游平原区, 人工绿洲面积约 $12 \times 10^3 \text{ km}^2$, 养育近129万人口, 平均每平方千米绿洲承载107人。因此, 人工绿洲是内陆河流域生态系统的重要组成部分, 也是人类活动影响最大、人地水矛盾最突出的一个区域^[3]。

近几十年来, 由于黑河中游绿洲区人口数量急剧增长对粮食需求量的不断增加, 对人工绿洲区水土资源的开发利用强度不断加大^[4-5], 并主要体现在两个方面: 一是绿洲边缘区大面积的天然沙质草地被开垦为农业用地^[6]; 二是为了维护人工绿洲生态系统的安全, 在绿洲荒漠过渡带实施了一系列的绿洲生态环境保护建设工程, 将植被稀疏的天然沙质草地转变为不同类型的人工防风固沙林^[7-8]。从而在黑河中游荒漠绿洲过渡带形成了多样化的土地利用/覆被景观结构。然而, 天然荒漠草地转变为不同类型的人工林地和农田生态系统后, 由于土地覆被类型改变以及土地管理措施的差异, 将对生态系统的地表水文过程、土壤生态过程以及土壤盐渍化发育过程产生深刻的影响^[8-12]。近年来, 国内外学者在不同类型生态系统针对土地利用/覆被变化对土壤盐渍化发育过程的影响已开展了较多的研究^[13-14], 但关于土地利用变化和管理措施引起的土壤盐分环境变化对地面节肢动物群落演变过程的影响及其调控机制的研究尚鲜见报道^[15-18]。目前, 尚不清楚在干旱荒漠环境下由于土地利用变化和管理措施引起的土壤盐分环境变化究竟会给地面节肢动物多样性的形成带来什么样的潜在影响? 也不清楚地面节肢动物群落关键种群对土壤盐分环境变化的响应与适应机理? 因此, 深入开展不同土地利用/管理方式下地面节肢动物群落对土壤盐渍化的响应机理的

*国家自然科学基金黑河流域生态-水文过程集成研究重大研究计划培育项目(91025021)、国家重点基础研究发展计划项目(2009CB421302)和城市与区域生态国家重点实验室开放基金项目(SKLU2009-2-3)资助
†通讯作者, E-mail: lifengrui@lzb.ac.cn

作者简介: 刘继亮(1979-), 男, 黑龙江人, 博士研究生, 主要从事土壤动物生态学研究。E-mail:

liujl707@lzb.ac.cn

收稿日期: 2011-05-03; 收到修改稿日期: 2011-07-18

研究, 将有助于准确认识和理解荒漠绿洲生态系统土壤动物多样性的分布格局及其维持机制, 并为荒漠绿洲生态系统的综合管理及其功能和健康评价提供新的思路。本文以荒漠绿洲过渡带由天然沙质草地转变为的人工梭梭灌木林 (21a)、人工杨树林 (28a)、人工樟子松林 (33a) 和灌溉农田 (27a) 为研究对象, 以天然沙质草地为对照, 通过对5种研究样地地面节肢动物群落的调查以及土壤可溶性盐含量及其组成的测定, 重点研究了不同土地利用/管理方式下表层土壤盐渍化特征及其对地面节肢动物群落演变及其多样性形成的影响机制。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地点位于甘肃省河西走廊中段黑河中游的临泽人工绿洲区 (39°21'N, 100°08'E; 平均海拔 1 384 m)。研究区域属温带大陆性干旱荒漠气候, 夏季炎热、冬季寒冷、降水稀少、光热资源丰富, 风沙灾害频繁。年平均降水量 117 mm, 年平均蒸发量 2 390 mm, 年平均气温 7.6 °C, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温 3 085 °C, 无霜期 165d。地带性土壤为灰棕漠土, 绿洲区主要土壤类型有绿洲潮土和灌漠土, 绿洲边缘区主要是风沙土。土壤母质主要是第四纪砂砾洪积-冲积物, 地下水埋深 3~5m^[6]。

1.2 研究样地选择

临泽绿洲是张掖绿洲生态系统的重要组成部分。近 50 年来, 在以水土资源开发利用和人工绿洲生态环境保护工程建设为主要特征的人类活动影响下, 绿洲边缘区大面积的天然沙质草地被转变为农田和不同类型的防风固沙人工林 (如杨树和樟子松人工林及人工梭梭灌木林等)。本研究以天然沙质草地转变的已开垦 27a 的灌溉农田 (简称灌溉农田, 下同) 及种植 21a 的人工梭梭灌木林、28a 的杨树人工林和 33a 的樟子松人工林 (简称梭梭、杨树和樟子松人工林, 下同) 为研究对象, 并以天然沙质草地 (简称天然草地, 下同) 为对照。所选择的 5 种研究样地形成了一个典型的土壤管理强度变化梯度: 天然草地和梭梭人工林实施零管理 (无灌溉也无施肥措施)、杨树和樟子松人工林实施灌溉管理、农田实施灌溉和施肥耦合管理。

1.3 样品采集与分析测定

对天然草地生态系统类型, 随机选择3个地点作为调查样区 (3个重复); 对梭梭、杨树和樟子松人工林生态系统类型, 每种类型选择种植时间相近 (最大相差不超过3a) 的3个样地 (3个重复) 作为调查样区; 对灌溉农田生态系统类型, 选择开垦年限相近 (最大相差不超过3a) 及管理措施相同的3块农田 (3个重复) 作为调查样区。采用国际通用的陷阱捕获法 (pitfall traps) 调查不同研究样地的地面节肢动物群落个体数量和类群丰富度^[19]。

具体调查方法是: 9月上旬在地面节肢动物群落数量和多样性的峰值期 (根据先前的预研究), 在每个调查样区随机布设陷阱收集器9个 (每种样地27个, 5种样地共计布设收集器135个)。为保证收集器在统计学上的独立性, 收集器的间距 $\geq 10\text{m}$ ^[20]。动物样品采集期为15d (9月3日至17日)。采样期间每3天检查一次收集器, 将捕获的动物样品放在75%的酒精溶液中, 带回实验室, 借助于实体显微镜和生物显微镜进行分类鉴定。所有样品鉴定到科, 优势类群鉴定到属或种, 并按不同类群 (科) 统计动物的个体数量和类群丰富度。样品鉴定主要依据参考文献^[21-24]。

对地面节肢动物群落进行调查期间, 在每个调查样区, 用土钻按"S"型取样, 共采取 9 个样点 0~20cm 土壤样品, 将 9 个样点风干后过 2mm 标准筛的土壤样品混匀形成一个混合样品, 在实验室进行 pH、可溶性盐分离子的分析。所有样品的测试在国土资源部兰州矿产资源监督检测中心实验室完成。其中, K^+ 和 Na^+ 采用火焰光度法进行测定; Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 采用原子吸收分光光度法测定; HCO_3^- 采用双指示剂-中和滴定法测定; Cl^- 采用硝酸银滴定法测定; SO_4^{2-} 采用硫酸钡质量法测定。土壤可溶性盐含量则为测定的土壤溶液中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 离子含量的总和。土壤 pH、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 离子和可溶性盐含量见表 1。

表 1 5 种研究样地土壤 pH、可溶性盐和主要盐分离子含量

Table 1 Soil pH, soluble salt and salt ion (mean \pm s.d.) in soils of five sampling plots different in land-use/cover types

	天然荒漠草地 natural desert grassland	人工梭梭灌木林 21-year-old planted shrubland	杨树人工林 28-year-old Poplar plantation	樟子松人工林 33-year-old Pinus plantation	灌溉农田 27-year-old farmland	F
pH	9.4 \pm 0.1a	8.1 \pm 0.003c	8.4 \pm 0.04bc	8.2 \pm 0.1c	8.7 \pm 0.04b	30.71***
K ⁺ (mg kg ⁻¹)	14.4 \pm 2.9a	20.0 \pm 1.0a	23.3 \pm 3.9a	18.9 \pm 4.8a	18.9 \pm 4.0a	0.83
Na ⁺ (mg kg ⁻¹)	102.0 \pm 7.7b	151.9 \pm 7.9a	42.0 \pm 2.7d	60.0 \pm 2.1c	39.6 \pm 2.0d	106.09***
Ca ²⁺ (mg kg ⁻¹)	17.2 \pm 1.5c	277.2 \pm 3.9a	57.8 \pm 7.8b	81.7 \pm 23.0b	41.1 \pm 2.9c	45.35***
Mg ²⁺ (mg kg ⁻¹)	13.3 \pm 1.9b	31.1 \pm 1.1a	30.0 \pm 2.9a	40.0 \pm 10.7a	34.4 \pm 4.8a	6.83**
Cl ⁻ (mg kg ⁻¹)	27.80.1 \pm 5.5b	32.4 \pm 3.1ab	28.2 \pm 2.4b	52.7 \pm 6.5a	25.6 \pm 3.0b	4.54*
HCO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹)	306.1 \pm 23.7a	203.3 \pm 6.7b	291.7 \pm 30.9a	218.3 \pm 24.9b	275.6 \pm 19.5a	11.02**
SO ₄ ²⁻ (mg kg ⁻¹)	91.3 \pm 16.7c	1067.0 \pm 136.7a	189.8 \pm 24.1ab	438.2 \pm 164.4b	135.6 \pm 17.0c	22.36***
可溶性盐 soluble salt(mg kg ⁻¹)	572.2 \pm 38.9c	1783.0 \pm 132.7a	662.7 \pm 39.1bc	909.8 \pm 194.3b	570.8 \pm 45.8c	17.62**

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$

1.4 数据分析

将已鉴定出的地面节肢动物样品统计种类和个体数量。采用节肢动物不同类群个体数量占群落总个体数量的比例代表该类群的相对多度。采用单因素方差分析和Tukey多重比较法确定不同研究样地的地面节肢动物群落个体数量和类群丰富度的差异，以及不同样地的土壤pH、可溶性盐含量及各个盐分离子含量的差异。为了保证数据满足正态分布，对动物个体数量和类群丰富度、土壤pH、可溶性盐含量及各个盐分离子浓度数据进行了对数转换。

利用建立的5种研究样地地面节肢动物群落个体数量和类群丰富度数据矩阵及土壤盐分环境因子数据矩阵，采用线性的冗余度对应分析 (Redundancy analysis, RDA) 定量研究地面节肢动物群落 (出现生境数 ≥ 3 的动物类群参与排序分析) 分布与土壤pH、可溶性盐和各个盐分离子之间的关系。此外，采用偏RDA分析 (partial RDA) 和蒙特卡洛置换检验 (Monte-Carlo permutation test)，定量评价每个环境因子对地面节肢动物群落分布的贡献率 (即各因子的独立解释量)。在偏RDA分析的基础上，进一步选择对地面节肢动物分布有显著影响的解释变量，绘制动物类群分布与解释变量关系的RDA二维排序图 (biplot)。应用国际通用的排序软件CANOCO 4.5 进行分析运算^[25]。为了保证试验数据满足正态分布及减小异常值对分析结果的影响，在进行RDA排序分析之前，对动物个体数量及土壤pH、可溶性盐和各个盐分离子含量数据进行对数转换。

此外，采用多元线性回归分析确定5个关键解释变量对地面节肢动物个体数量和类群丰富度的综合影响，采用一元线性和非线性回归分析确定地面节肢动物个体数量和类群丰富度对每个关键解释变量的响应。统计分析使用SPSS16.0软件。

2 结果

2.1 地面节肢动物群落组成对土壤盐分环境变化的响应

5种研究样地共捕获地面节肢动物3299头，分属41个科 (表2)。其中天然荒漠草地捕获1548头，分属21个科，主要类群是拟步甲科 (相对多度为66.9%)、蚁科 (相对多度为15.1%) 和步甲科 (相对多度为7.3%)，象甲科、逍遥蛛科和石蛎目是该样地的特有类群。人工梭梭灌木林地共捕获动物476头，分属19个科，主要类群是蚁科 (相对多度为46.8%)、拟步甲科 (相对多度为30.3%)、狼蛛科 (相对多度为6.5%) 和平腹蛛科 (相对多度为5.0%)，蚁蛉科和锯谷盗科是该样地的特有类群。杨树人工林地捕获动物424头，分属22个科，主要类群是蚁科 (相对多度为47.4%)、狼蛛科 (相对多度为19.1%) 和平腹蛛科 (相对多度为7.3%)，阎甲科、蝗总科、蜡蝉总科、花蚤科和

伪叶甲科是该样地的特有类群。樟子松人工林地捕获动物 367 头，分属 19 个科，主要类群是蚜总科（相对多度为 21.5%），缘椿科（相对多度为 16.6%）、球蛛科（相对多度为 15.3%）和蚁科（相对多度为 13.6%），红椿科和卷甲虫科是该样地的特有类群。灌溉农田捕获动物 484 头，分属 22 个科，主要类群是蚁科（相对多度为 33.1%）、蚜总科（相对多度为 13.0%）、步甲科（相对多度为 11.4%）和狼蛛科（相对多度为 9.1%），蟹蛛科和叩甲科仅在该样地中发现。

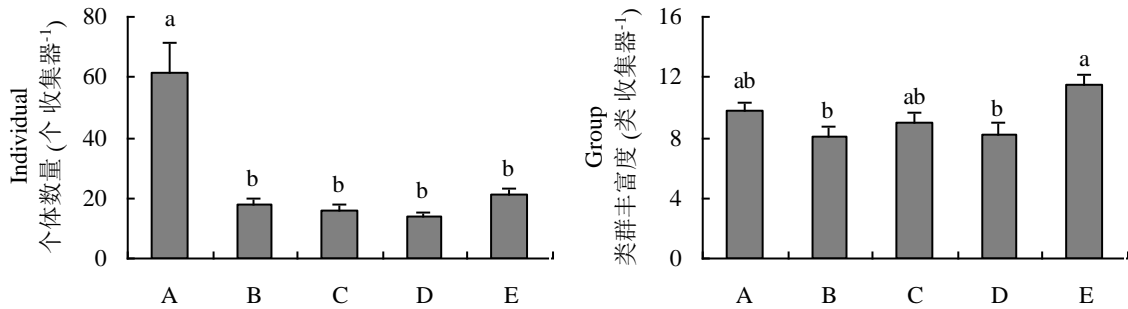
表 2 5 种研究样地地面节肢动物群落组成特征

Table 2 Composition of ground arthropod communities in the soils of five sampling plots different in land-use (个收集器⁻¹)

动物类群 Group	天然荒漠草地 natural desert grassland	人工梭梭灌木林 21-year-old planted shrubland	杨树人工林 28-year-old <i>Poplar</i> plantation	樟子松人工林 33-year-old <i>Pinus</i> plantation	灌溉农田 27-year-old farmland
卡尔避日蛛科 Karschiidae	5 (0.32%)	6 (1.26%)			
皿网蛛科 Linyphiidae	1 (0.06%)	5 (1.05%)		4 (1.09%)	
球蛛科 Nesticidae			4 (0.94%)	56 (15.26%)	7 (1.45%)
平腹蛛科 Gnaphosidae	37 (2.39%)	24 (5.04%)	31 (7.31%)	3 (0.82%)	3 (0.62%)
跳蛛科 Salticidae	41 (2.65%)	2 (0.42%)		1 (0.27%)	
园蛛科 Araneidae	3 (0.19%)			9 (2.45%)	14 (2.89%)
狼蛛科 Lycosidae	14 (0.9%)	31 (6.51%)	81 (19.1%)	15 (4.09%)	44 (9.09%)
逍遥蛛科 Philodromidae	8 (0.52%)				
蟹蛛科 Thomisidae					1 (0.21%)
石蛎目 Microcoryphia	1 (0.06%)				
啮科 Psocidae			3 (0.71%)	8 (2.18%)	
蚁蛉科 Myrmeleontidae		3 (0.63%)			
虎甲科 Cicindelidae			8 (1.89%)		28 (5.79%)
步甲科 Carabidae	113 (7.3%)	5 (1.05%)	10 (2.36%)	3 (0.82%)	55 (11.36%)
隐翅虫科 Staphylinidae			9 (2.12%)	3 (0.82%)	26 (5.37%)
阎甲科 Histeridae			17 (4.01%)		
瓢甲科 Coccinellidae		1 (0.21%)		16 (4.36%)	34 (7.02%)
花蚤科 Mordellidae			1 (0.24%)		
蝗总科 Acridoidea			2 (0.47%)		
蓟马科 Thripidae		6 (1.26%)	7 (1.65%)		2 (0.41%)
蜡蝉总科 Fulgoroidea			6 (1.42%)		
叶蝉总科 Cicadelloidea	6 (0.39%)	5 (1.05%)	2 (0.47%)		12 (2.48%)
蚜总科 Aphidoidea	1 (0.06%)			79 (21.53%)	63 (13.02%)
椿科 Pentatomidae		2 (0.42%)		43 (11.72%)	7 (1.45%)
红椿科 Pyrrhocoridae				1 (0.27%)	
缘椿科 Coreidae			1 (0.24%)	61 (16.62%)	1 (0.21%)
长椿科 Lygaeidae	14 (0.9%)	6 (1.26%)	5 (1.18%)	8 (2.18%)	2 (0.41%)
鳃金龟科 Melolonthidae	2 (0.13%)		1 (0.24%)	1 (0.27%)	5 (1.03%)
叩甲科 Elateridae					1 (0.21%)
谷盗科 Trogossitidae			10 (2.36%)		9 (1.86%)
锯谷盗科 Silvanidae		3 (0.63%)			
象甲科 Curculionidae	25 (1.6%)				
夜蛾科 Noctuidae	1 (0.06%)	1 (0.21%)	2 (0.47%)	5 (1.36%)	2 (0.41%)

卷甲虫科 Armadillidiidae				1 (0.27%)	
气肢虫科 Trachelipidae	1 (0.06%)	4 (0.84%)			1 (0.21%)
葬甲科 Silphidae	5 (0.32%)		1 (0.24%)		
拟步甲科 Tenebrionidae	1035 (66.86%)	144 (30.25%)			
伪叶甲科 Lagriinae			2 (0.47%)		
蟋蟀总科 Grylloidea		1 (0.21%)	20 (4.72%)		
绵螋科 Spongiphoridae	2 (0.13%)	4 (0.84%)			7 (1.45%)
蚁科 Formicidae	233 (15.05%)	223 (46.85%)	201 (47.41%)	50 (13.62%)	160 (33.06%)

注：括号中的数字是相对多度 Note: data in parentheses are relative abundance



A: 天然荒漠草地; B: 人工梭梭灌木林; C: 杨树人工林; D: 樟子松人工林; E: 灌溉农田 A: natural desert grassland; B: 21-year-old planted *Haloxylon ammodendron* shrubland; C: 28-year-old *Poplar* plantation; D: 33-year-old *Pinus* plantation; and E: 27-year-old farmland

图 1 5 种研究样地地面节肢动物群落个体数量和类群丰富度

Fig. 1 Numbers of individuals and richness of groups of ground arthropod communities of the 5 sampling plots different in land-use

土地覆被变化和管理措施对地面节肢动物个体数量 ($F_{5,53} = 20.44, P = 0.0001$) 和类群丰富度 ($F_{5,53} = 4.40, P = 0.0048$) 均有显著影响。将天然草地转变为人工林地和灌溉农田后, 地面节肢动物个体数量显著降低 (图 1)。然而, 在 5 种土地利用方式下, 灌溉农田的地面节肢动物群落类群丰富度显著高于梭梭灌木林和樟子松人工林, 而与天然草地和杨树人工林差异不显著 (图 1)。

对地面节肢动物群落分布与土壤 pH、可溶性盐及 7 种主要盐分离子含量关系的 RDA 排序分析结果表明, 第 1 典型轴和所有典型轴在统计学上达到极显著水平 (表 3), 说明排序分析能够较好地反映地面节肢动物群落分布与土壤盐分环境因子的关系。前两个排序轴累积解释了地面节肢动物群落分布 50% 的变异。对土壤 pH、可溶性盐及 7 种主要盐分离子含量对地面节肢动物群落分布变化的贡献率的偏 RDA 分析结果表明, 土壤 pH、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 离子含量对地面节肢动物群落的分布格局有显著影响, 这 5 个因子的贡献率分别为 14%、22%、43%、10% 和 4% (表 4)。

表 3 地面节肢动物群落的 RDA 排序轴的特征值、动物类群与环境因子的相关系数

Table 3 Eigenvalues of the RDA ordination axes and taxa-environment correlations of the ground arthropod community

	排序轴 1 Axis 1	排序轴 2 Axis 2	排序轴 3 Axis 3	排序轴 4 Axis 4
特征值 Eigenvalues	0.431	0.069	0.053	0.021
动物类群与环境因子相关性 Taxa-environment correlations	0.959	0.77	0.769	0.584
累积解释因变量变异百分数 Cumulative percentage of variation explained	43.1	49.9	55.2	57.3

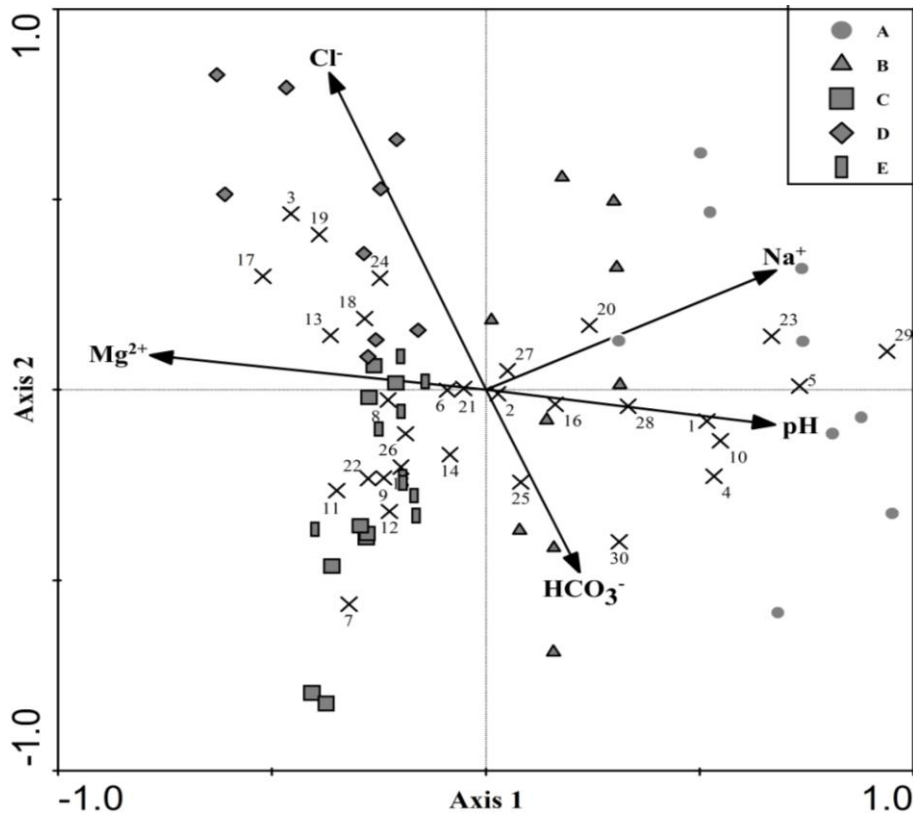
第 1 典型轴显著性的蒙特卡洛置换检验 Monte-Carlo permutation test of
 significance of the 1st typical axis $F = 26.41, p = 0.001$
 所有典型轴显著性的蒙特卡洛置换检验 Monte-Carlo permutation test of
 significance of all the typical axes $F = 5.92, p = 0.001$

表 4 土壤 pH、可溶性盐及 7 种盐分离子含量对地面节肢动物群落分布的独立影响作用的偏 RDA 分析
Table 4 Partial RDA of relative contribution of each of the nine environmental variables (soil pH, soil salt content and concentrations of 7 salt ions) to variation of the distribution of the ground arthropod community

	λ	贡献率 Variation explained (%)	F	p
土壤 pH	0.082	13.67	6.36	0.001
K ⁺ (mg kg ⁻¹)	0.011	1.83	0.98	0.449
Na ⁺ (mg kg ⁻¹)	0.129	21.50	8.83	0.001
Ca ²⁺ (mg kg ⁻¹)	0.009	1.50	0.81	0.635
Mg ²⁺ (mg kg ⁻¹)	0.260	43.33	15.12	0.001
Cl ⁻ (mg kg ⁻¹)	0.057	9.50	4.79	0.001
HCO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹)	0.024	4.00	2.10	0.015
SO ₄ ²⁻ (mg kg ⁻¹)	0.013	2.17	1.18	0.285
可溶性盐 Soluble salt(mg kg ⁻¹)	0.015	2.50	1.29	0.181

选择对地面节肢动物群落分布有显著影响的 5 个解释变量（土壤 pH、Na⁺、Mg²⁺、Cl⁻、HCO₃⁻ 离子），绘制研究样地动物类群分布与解释变量关系的 RDA 二维排序图(图 2)。从 RDA 排序图可以看出：与第 1 排序轴相关性较大的是土壤 pH、Na⁺和 Mg²⁺离子，其中土壤 pH 和 Na⁺离子与排序轴 1 呈显著正相关（相关系数分别为 0.641 和 0.644），Mg²⁺与排序轴 1 呈显著负相关（相关系数为-0.744）。因此，排序轴 1 主要反映了土壤 pH、Na⁺和 Mg²⁺离子的变化梯度。与第 2 排序轴相关性较大的是 Cl⁻离子，它与排序轴 2 呈显著正相关（相关系数为 0.625），因此排序轴 2 主要反映了 Cl⁻离子的变化梯度。

从排序图还可以看出，拟步甲科、象甲科、步甲科、跳蛛科、平腹蛛科和卡尔避日蛛科等类群与排序轴 1 呈显著正相关性，它们的分布主要受土壤 pH 和 Na⁺离子的影响。球蛛科、蛎总科、缘椿科、椿科、瓢甲科等类群与排序轴 1 呈显著负相关，而与排序轴 2 呈显著正相关，它们的分布主要受 Mg²⁺和 Cl⁻离子含量的影响。隐翅虫科、狼蛛科、阎甲科、谷盗科、蜡蝉总科、虎甲科、蓟马科、蟋蟀总科等类群与排序轴 1 和 2 均呈显著负相关，它们的分布主要受 Mg²⁺和 HCO₃⁻离子含量的影响。此外，蚁科与排序轴 1 呈显著正相关，与排序轴 2 呈显著负相关，说明该类群的分布受土壤 pH、Na⁺和 HCO₃⁻离子含量的共同影响（图 2）。



注: A: 天然荒漠草地, B: 人工梭梭灌木林, C: 杨树人工林, D: 樟子松人工林, E: 灌溉农田, × 代表动物类群(科) Note: In the biplot, A: natural desert grassland, B: 21-year-old planted *Haloxylon ammodendron* shrubland, C: 28-year-old *Poplar* plantation, D: 33-year-old *Pinus* plantation, and E: 27-year-old farmland, × indicates taxa groups (family)。图中: 物种为 1-卡尔避日蛛科 Karschiidae, 2-皿网蛛科 Linyphiidae, 3-球蛛科 Nesticidae, 4-平腹蛛科 Gnaphosidae, 5-跳蛛科 Salticidae, 6-园蛛科 Araneidae, 7-狼蛛科 Lycosidae, 8-啮虫科 Psocidae, 9-虎甲科 Cicindelidae, 10-步甲科 Carabidae, 11-隐翅虫科 Staphylinidae, 12-阎甲科 Histeridae, 13-瓢甲科 Coccinellidae, 14-蓟马科 Thripidae, 15-蜡蝉总科 Fulgoroidea, 16-叶蝉总科 Cicadelloidea, 17-蚜总科 Aphidoidea, 18-椿科 Pentatomidae, 19-缘椿科 Coreidae, 20-长椿科 Lygaeidae, 21-鳃金龟科 Melolonthidae, 22-谷盗科 Trogossitidae, 23-象甲科 Curculionidae, 24-夜蛾科幼虫 Noctuidae, 25-气肢虫科 Trachelipidae, 26-蟋蟀总科 Grylloidea, 27-绵螋科 Spongiphoridae, 28-葬甲科 Silphidae, 29-拟步甲科 Tenebrionidae, 30-蚁科 Formicidae

图2 5种研究样地地面节肢动物群落分布与5个关键解释变量关系的RDA二维排序图

Fig. 2 The RDA two-dimensional ordination diagram of the relationships of the 5 key environmental variables (soil pH, and Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- concentrations) with distribution of the arthropod communities in the 5 sampling plots

多元回归分析表明, 土壤pH、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 离子5个关键变量仅解释了地面节肢动物类群丰富度22%的变异 ($R^2 = 0.216$, $n = 45$, $p = 0.0793$), 解释了个体数量66%的变异 ($R^2 = 0.659$, $n = 45$, $p < 0.0001$)。一元线性和非线性回归分析表明, 地面节肢动物个体数量与土壤pH存在显著的指数函数关系, 与 Na^+ 离子存在显著的二次曲线关系, 与 Mg^{2+} 离子存在显著的幂函数关系, 与 Cl^- 离子存在显著的负指数函数关系。类群丰富度仅与土壤pH呈显著的二次曲线关系及与 HCO_3^- 离子存在显著的线性关系, 而与 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 离子含量的关系不显著(图3)。

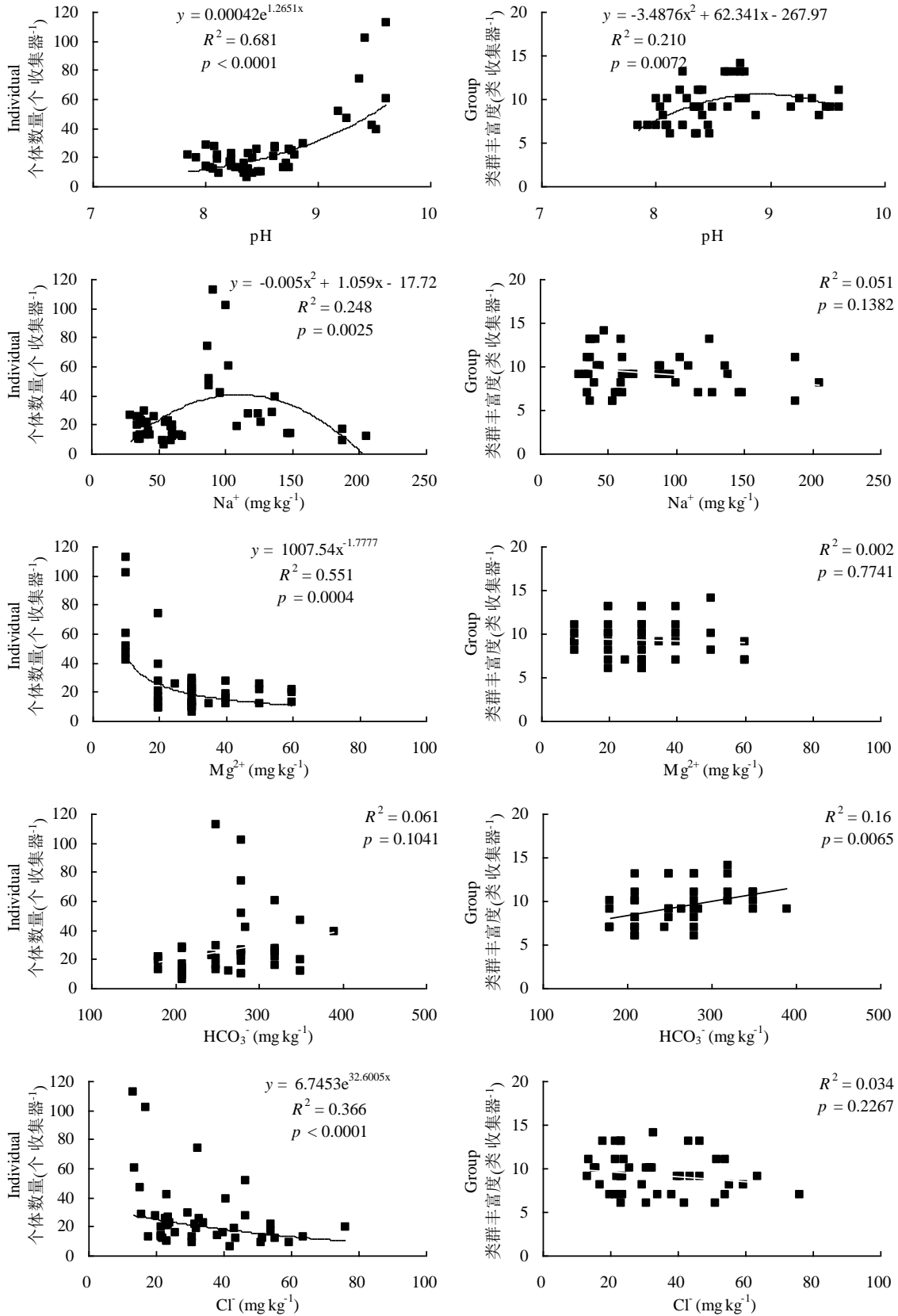


图3 地面节肢动物群落个体数量和类群丰富度与土壤pH、Na⁺、Mg²⁺、Cl⁻、HCO₃⁻离子含量的关系

Fig. 3 Relationships of soil pH and concentrations of four salt ions with number of individuals and groups of the ground arthropod communities. The data were fitted by linear and non-linear regressions ($n = 45$)

3 讨论

本研究发现,将天然沙质草地转变为人工梭梭灌木林、杨树和樟子松人工林和农田 20 多 a 后,导致了地面节肢动物个体数量的显著下降,但对群落的类群丰富度无显著影响。这一结果表明,地面节肢动物类群丰富度对土地利用/覆被变化的反应并不敏感,而动物个体数量对土地利用/覆被变化的反应十分强烈。因此,可以将地面节肢动物群落个体数量作为表征土地利用变化和管理措施扰动的一个重要生态指标。此外,在 5 种研究样地中农田生态系统的地面节肢动物类群丰富度最高,这表明农田生态系统具有较好的地面节肢动物多样性维持功能。

研究还表明,地面节肢动物群落个体数量和类群丰富度变化与土地利用变化引起的土壤 pH 和可溶性盐浓度的变化存在一定的相关性。综合应用多变量排序、多元和一元回归分析等方法对土地利用变化和管理措施引起的土壤盐分环境变化与地面节肢动物群落演变之间关系的定量研究获得了以下重要进展。重要发现之一是,在所测定的反映 5 个研究样地土壤盐分环境变化特征的 9 个指标中,土壤 pH、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 离子含量 5 个因子对地面节肢动物群落变化有显著影响,这 5 个因子分别解释了地面节肢动物类群丰富度 22% 的变异及动物个体数量 66% 的变异。这一结果支持 Liu 等^[17] 在我国华北平原盐渍化区进行的一项有关盐渍化对地面步甲科动物多样性影响的研究结果。该研究表明,地面步甲科动物群落多样性的分布模式明显受土壤盐渍化分布格局的影响。偏 RDA 分析进一步显示,在土壤 pH、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 离子 5 个关键解释变量中, Mg^{2+} 和 Na^+ 离子含量对地面节肢动物群落变化的贡献率最大(其独立解释量分别为 43% 和 22%),因而是主导影响因子。同时,土壤 pH 和 Cl^- 离子含量对地面节肢动物群落变化的贡献率也较大(独立解释量分别为 14% 和 10%),同样是影响地面节肢动物群落分布的关键生态因子。然而,在本研究中,土壤 pH、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 离子含量 5 个因子的变化仅解释了地面节肢动物 22% 的类群丰富度变异及 66% 的个体数量变异,这表明除了土壤盐分含量对地面节肢动物群落产生影响外,其他因子如植被特征和土壤理化特性等同样会对地面节肢动物群落的演变产生一定的影响^[8,26-27]。另一项重要发现是,地面节肢动物个体数量和类群丰富度对土壤盐分环境变化的响应与适应机理有所不同。与类群丰富度相比,动物个体数量对土壤盐分环境变化的反应更为敏感,因而是一个能够更好地表征土地利用变化和管理措施对地面节肢动物群落影响的生态指标^[28]。这一结果与 Stenbacka 等^[29] 在瑞典北部地区对处于不同演替阶段和实施不同强度采伐管理的 5 种云杉林地甲虫群落数量和物种丰富度变化特征的研究结果相一致。在该研究中,Stenbacka 等^[29] 发现采伐管理强度对云杉林地甲虫群落个体数量的影响要明显大于物种丰富度。

此外,对地面节肢动物个体数量和类群丰富度与 5 个关键解释变量关系的一元线性和非线性回归分析发现,5 个解释变量对动物个体数量和类群丰富度的影响机理明显不同(图 3)。例如,在本研究中,表层土壤 pH 与地面节肢动物个体数量呈显著的正相关关系,表明动物个体数量随着土壤 pH 的增加而增加。土壤 pH 对地面节肢动物个体数量的影响主要体现在,较多的拟步甲科、象甲科、步甲科、跳蛛科、平腹蛛科和卡尔避日蛛科等动物类群分布在高 pH 值的天然荒漠草地生境中(图 3)。已有的研究认为,土壤 pH 可以通过多种途径或机制对土壤动物群落产生深刻影响。目前得到较多学者认同的一种解释是:土壤 pH 的变化可以通过直接影响土壤溶液中常量和微量元素的吸收性以及土壤有机物质的数量和质量而对土壤动物的生长发育和繁殖过程产生重要影响,进而影响土壤动物群落的结构、组成、数量和多样性^[16,30-35]。与土壤 pH 不同,地面节肢动物个体数量与表层土壤 Mg^{2+} 、 Cl^- 离子含量呈显著负相关关系,这表明动物个体数量随着土壤中氯化物(MgCl_2) 盐浓度的增加而下降(图 3),同时也表明高浓度的氯化物盐对土壤动物有明显的毒害作用。Schrader 等^[36] 和 Owojori 等^[16] 的研究结果均表明,土壤中的 Cl^- 离子等其他一些可溶性盐可通过直接影响土壤生物的生长发育和繁殖过程而对土壤生物群落的生存产生重要影响。因此,土壤中氯化物盐(Mg^{2+} 、 Cl^- 离子)含量的变化对土壤动物生长发育和繁殖过程的影响的生物学机制是亟待深入研究的一个关键问题。与地面节肢动物个体数量对土壤 pH 及 Mg^{2+} 、 Cl^- 离子含量的响应不同,动物个体数量与 Na^+ 离子含量呈显著的二次曲线关系(图 3)。这表明初始地面节肢动

物个体数量随着 Na^+ 离子浓度的增加而增加, 当 Na^+ 离子浓度达到 106 mg kg^{-1} 左右时, 动物个体数量达到最大值 (41 个收集器⁻¹), 此后随着 Na^+ 离子浓度的继续增加, 动物个体数量呈显著下降趋势。在本研究体系中, 土壤中 Na^+ 离子浓度的生态阈值大约是 106 mg kg^{-1} 左右, 然而, 对这一生态阈值仍需要通过进一步的控制实验研究来验证^[37-38]。

4 结论

1) 土地利用变化和管理措施相互作用共同驱动了地面节肢动物群落的演变过程, 将天然荒漠草地植被转变为人工林和农田20多年后, 显著降低了地面节肢动物群落的数量, 而对动物类群丰富度的影响并不显著。

2) 系统解析了土壤盐碱环境变化对地面节肢动物群落演变的影响及其驱动机制。最重要的发现是, 地面节肢动物群落演变过程受土壤pH、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 离子含量4个因子的共同影响, 其中土壤pH、 Na^+ 和 Mg^{2+} 离子对地面节肢动物群落变化的贡献率最大, 是关键驱动因子。

3) 土壤pH、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 离子含量对地面节肢动物个体数量和类群丰富度的影响效应与作用机制存在一定差异。动物个体数量随着土壤pH的增加而增加, 随着 Mg^{2+} 、 Cl^- 离子含量的增加而下降。动物个体数量与 Na^+ 离子含量呈显著二次曲线关系, 当 Na^+ 离子浓度达到 106 mg kg^{-1} 左右时动物个体数量达到最大值, 此后随着 Na^+ 离子浓度的增加, 动物个体数量显著下降。

参考文献

- [1] 肖春生, 肖洪浪. 黑河流域水环境演变及其驱动机制研究进展. 地球科学进展, 2008, 23(7): 748-755. Xiao C S, Xiao H L. Advances in the study of the water regime process and driving mechanism in the Heihe River Basin (In Chinese). Advances in Earth Science, 2008, 23(7): 748-755
- [2] Li X, Li X W, Li Z Y, et al. Watershed allied telemetry experimental research. J Geophys Res, 2009, 114: D22103, doi:10.1029/2008JD011590
- [3] 陈曦. 中国干旱区土地利用与土地覆被变化. 北京: 科学出版社, 2008. Chen X. Land-use/cover change in arid regions of China (In Chinese). Beijing: Science Press, 2008
- [4] 张钰, 刘桂民, 马海燕. 黑河流域土地利用与覆被变化特征. 冰川冻土, 2004, 26(6): 740-746. Zhang Y, Liu G M, Ma H Y. Changing characteristics of land-use and land-cover in the Heie River Basin, China during 1987—2000 (In Chinese). Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(6): 740-746
- [5] 常娟, 王根绪, 王一博. 黑河流域土地利用变化的影响因素—以张掖地区为例. 冰川冻土, 2005, 27(1): 117-123. Chang J, Wang G X, Wang Y B. Driving factors of land use change in the Heihe River: Case study of Zhangye prefecture (In Chinese). Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(1): 117-123
- [6] 王琦, 李锋瑞, 张智慧. 灌溉与施氮对黑河中游新垦沙地农田土壤硝态氮动态的影响. 环境科学, 2008, 29(7): 291-299. Wang Q, Li F R, Zhang Z H. Effects of different irrigation and nitrogen supply levels on nitrate-N dynamics in a recently reclaimed sandy farmland in Heihe River Basin (In Chinese). Environmental Science, 2008, 29(7): 291-299
- [7] Su Y, Zhao W Z, Su P X, et al. Ecological effects of desertification control and desertified land reclamation in an oasis-desert ecotone in an arid region: A case study in Hexi Corridor, northwest China. Ecological Engineering, 2007, 29(2): 117-124
- [8] 李锋瑞, 刘继亮, 化伟, 等. 地面节肢动物营养类群对土地覆被变化和管理扰动的响应. 生态学报, 2011, 31(15): 3268-3281. Li F R, Liu J L, Hua W, et al. Trophic group responses of ground arthropods to land-cover change and management disturbance (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(15): 3268-3281

- [9] 樊自立, 马英杰, 马映军. 中国西部地区耕地土壤盐渍化评估及发展趋势预测. 干旱区地理, 2002, 25(2): 97-102. Fan Z L, Ma Y J, Ma Y J. Assessment and prediction of developing trend of soil salinization of the cultivated land in west China (In Chinese). *Arid Land Geography*, 2002, 25(2): 97-102
- [10] 韩茜, 熊黑钢. 奇台县绿洲农田土壤盐渍化逆向演替过程. 水土保持学报, 2008, 22(2): 93-97. Han Q, Xiong H G. Reversal evolution of farmland soil salinization in Qitai oasis (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(2): 93-97
- [11] 周洪华, 陈亚宁, 李卫红. 新疆铁干里克绿洲水文过程对土壤盐渍化的影响. 地理学报, 2008, 63(7): 714-724. Zhou H H, Chen Y N, Li W H. Effect of oasis hydrological processes on soil salinization of Tikanlik oasis in the Lower Tarim River (In Chinese). *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(7): 714-724
- [12] 石迎春, 辛民高, 郭娇, 等. 西北地区黑河中游盐渍化地区土壤盐分特征. 现代地质, 2009, 23(1): 28-37. Shi Y C, Xin M G, Guo J, et al. Salt characteristics of salt-affected soil in the middle reach of heihe river in Gansu Province (In Chinese). *Geoscience*, 2009, 23(1): 28-37
- [13] 李晓军, 李取生. 松嫩平原西部土地利用变化及其盐渍化效应研究—以大安市为例. 干旱区资源与环境, 2005, 19(3): 88-92. Li X J, Li Q S. Studies on land use change and the land salinization of the western Songnen Plain — A case study on Da'an City (In Chinese). *Journal of Arid Land Resources & Environment*, 2005, 19(3): 88-92
- [14] 尤全刚, 薛娴, 黄翠华. 地下水深埋区咸水灌溉对土壤盐渍化影响的初步研究—以民勤绿洲为例. 中国沙漠, 2011, 31(2): 302-308. You Q G, Xue X, Huang C H. Preliminary study on the effects of saline water irrigation on soil salinization in deep groundwater area: A case study of Minqin oasis (In Chinese). *Journal of Desert Research*, 2011, 31(2): 302-308
- [15] Schrader G, Metge K, Bahadir M. Importance of salt ions in ecotoxicological tests with soil arthropods. *Applied Soil Ecology*, 1998, 7: 189-193
- [16] Liu Y H, Yu Z R, Gu W B. Diversity of carabids (Coleoptera, Carabidae) in the desalinized agricultural landscape of Quzhou county, China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, 113: 45-50
- [17] Owojori O J, Reinecke A J, Voua-Otomo P, et al. Comparative study of the effects of salinity on life-cycle parameters of four soil-dwelling species (*Folsomia candida*, *Enchytraeus doerjesi*, *Eisenia fetida* and *Aporrectodea caliginosa*). *Pedobiologia*, 2009, 52: 351-360
- [18] 殷秀琴, 宋博, 董炜华, 等. 我国土壤动物生态地理研究进展. 地理学报, 2010, 65(1): 91-102. Yin X Q, Song B, Dong W H, et al. A review on the eco-geography of soil fauna in China (In Chinese). *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(1): 91-102
- [19] 刘继亮, 李锋瑞, 刘七军, 等. 黑河流域干旱荒漠土壤动物群落组成与多样性的季节变异. 中国沙漠, 2010, 30(2): 342-349. Liu J L, Li F R, Liu Q J, et al. Composition and diversity of surface-active soil fauna communities in arid desert ecosystems of the Heihe Basin (In Chinese). *Journal of Desert Research*, 2010, 30(2): 342-349
- [20] Ziesche T M, Roth M. Influence of environmental parameters on small scale distribution of soil dwelling spiders in forests: What makes the difference, tree species or microhabitat? *Forest Ecology and Management*, 2008, 255: 738-752
- [21] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 2000. Yin W Y. Pictorial keys to soil animals of China (In Chinese). Beijing: Science Press, 2000
- [22] 郑乐怡, 归鸿. 昆虫分类. 南京: 南京师范大学出版社, 1999. Zheng L Y, Gui H. Classification of Insects in China (In Chinese). Nanjing: Nanjing Normal University Publishing House, 1999
- [23] 胡金林. 中国农林蜘蛛. 天津: 天津科学技术出版社, 1984. Hu J L. Agricultural and Forestry Spiders in China (In Chinese). Tianjin: Tianjin Science and Technology Publishing House, 1984
- [24] 任国栋, 于有志. 中国荒漠半荒漠的拟步甲科昆虫. 保定: 河北大学出版社, 1999. Ren G D, Yu Y Z. The darkening beetles from deserts and semi-deserts of China (Coleoptera: Tenebrionidae) (In Chinese). Baoding: Hebei University Publishing House, 1999

- [25] ter Braak C J F, Smilauer P. CANOCO reference manual and CanoDraw for Windows User's guide: Software for canonical community ordination (Version 4.5). NY: Microcomputer Power, Ithaca, 2002.
- [26] Crist T O, Pradhan-Devare S V, Summerville K S. Spatial variation in insect community and species responses to habitat loss and plant community composition. *Oecologia*, 2006, 147: 510–521
- [27] 贺奇, 王新谱, 杨贵军. 宁夏盐池荒漠草原步甲物种多样性. *生态学报*, 2011, 31(4): 923-932. He Q, Wang X P, Yang G J. Species diversity of carabid beetles in desert-steppe in Yanchi of Ningxia, China(In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(4): 923–932
- [28] Rykken J J, Capen D E, Mahabir S P. Ground beetles as indicators of land type diversity in the Green Mountains of Vermont. *Conservation Biology*, 1997, 11: 522-530
- [29] Stenbacka F, Joakim H J, Jacek H J, et al. Saproxyllic and non-saproxyllic beetle assemblages in boreal spruce forests of different age and forestry intensity. *Ecological Applications*, 2010, 20(8): 2310–2321.
- [30] Impellitteri C A, Saxe J K, Cochran M, et al. Predicting the bioavailability of copper and zinc in soils: Modeling the partitioning of potentially bioavailable copper and zinc from soil solid to soil solution. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2003, 22(6): 1380-1386
- [31] Lamb E G. Direct and indirect control of species richness and evenness by litter, resources, and neighbor biomass in a native grassland. *Ecology*, 2008, 89: 216–225
- [32] Fu S L, Zou X M, Coleman D. Highlights and perspectives of soil biology and ecology research in China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41: 868-878
- [33] Eisenhauer N, Bebler H, Engels C, et al. Plant diversity effects on soil microorganisms support the singular hypothesis. *Ecology*, 2010, 91: 485-496
- [34] Brussaard L, Behan-Pelletier V M, Bignell D E, et al. Biodiversity and ecosystem functioning in soil. *Ambio*, 1997, 26, 563-570
- [35] 宋博, 马建华, 李剑, 等. 开封市土壤动物及其对土壤污染的反应. *土壤学报*, 2007, 44(3) : 529-535
Song B, Ma J H, Li J, et al. Soil animals and their response to soil pollution in Kaifeng city (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(3) : 529-535
- [36] Schrader G, Metge K, Bahadir M. Importance of salt ions in ecotoxicological tests with soil arthropods. *Applied Soil Ecology*, 1998, 7: 189-193
- [37] Wall D H, Virginia R A. Controls on soil biodiversity: Insights from extreme environments. *Applied Soil Ecology*, 1999, 13(2): 137-150
- [38] Salmon S, Ponge J F, van Straalen N M. Ionic identity of pore water influences pH preference in Collembola. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(11): 1663-1667

Responses of ground arthropods to soil salinization in lands different in land-use/cover type in the middle reaches of Heihe River

Liu Jiliang^{1,2} Li Fengrui^{1,2*} Niu Ruixue^{1,2} Liu Qijun^{1,2} Qin Yu^{1,2} Liu Changan^{1,2}

(1 Ecology and Agriculture Laboratory, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

(2 Linze Inland River Basin Research Station, Chinese Ecosystem Research Network, Lanzhou 730000, China)

Abstract For decades, a large area of natural desert grasslands in the middle reaches of the Heihe River in Hexi Corridor of Northwest China has been converted tract by tract into farmland and plantation. However, few researchers have addressed responses of ground arthropod communities to soil salinization in lands different in land-use and management. In this study, five major types of land use 21-year-old planted shrubland without irrigation and fertilization, 28-year-old irrigated *Poplar* plantation and 33-year-old irrigated *Pinus* plantation, 27-year-old farmland with irrigation and fertilization, and natural desert grassland were selected for comparison with the last one as control. All the sampling plots, except the last used to be natural desert grassland. Soil salinity and its composition in the surface layer and ground arthropod communities in the plots were observed. Based on the observations, redundancy analysis (RDA) and multiple regression analysis were performed to determine relationships between the distribution of the arthropod community and soil salinization variables. The one-way analysis of variance demonstrated that the conversion of natural grassland to planted shrubland, *Poplar* plantation, *Pinus* plantation and farmland significantly reduced abundance of the ground arthropod community, but little affected species richness of the arthropod community. Results of RDA show that soil salinization properties had significant and differential effects on abundance and species richness of the arthropod community. The key factors affecting composition of the ground arthropod community were soil pH, Na⁺, Mg²⁺, Cl⁻ and SO₄²⁻ concentrations in the topsoil layer. Abundance of the ground arthropods increased with increasing soil pH and decreased with increasing Mg²⁺ and Cl⁻ concentrations. The findings suggest that change in soil salinity environment caused by changes in land-use and management is one of the key variables driving evolution of the ground arthropod community.

Key words Heihe River Basin; Land-use change; Management disturbance; Soil salinization; Ground arthropods; Multivariate analysis