

额济纳荒漠绿洲植物群落的数量分类及其与地下水环境的关系分析

朱军涛¹ 于静洁^{1*} 王平¹ 王志勇^{1,2}

¹陆地水循环及地表过程重点实验室, 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; ²中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 为了科学地评价和预测生态输水对额济纳荒漠绿洲天然植被的影响, 亟需掌握额济纳荒漠绿洲的植物群落类型, 建立植被-环境因子的响应关系。该研究对额济纳荒漠绿洲的植物群落展开调查, 获取植物群落特征、分布状况及地下水环境数据, 应用双向指示种分析方法(TWINSPAN)对群落进行分类, 采用无偏对应分析(DCA)、无偏典范对应分析(DCCA)方法对群落进行排序, 得出额济纳荒漠绿洲主要植物群落类型, 以及影响植被类型变化和分布的地下水环境因子。研究结果表明: (1)采用TWINSPAN数量分类方法, 将植被划分为芦苇+杂类草(Ass. *Phragmites australis* + herbs)、胡杨-红柳+杂类草(Ass. *Populus euphratica*-*Tamarix ramosissima* + herbs)、沙枣-红柳+杂类草(Ass. *Elaeagnus angustifolia*-*Tamarix ramosissima* + herbs)、红柳-杂类草(Ass. *Tamarix ramosissima*-herbs)、花花柴-白刺+沙蒿+沙拐枣(Ass. *Karelinia caspica*-*Nitraria tangutorum* + *Artemisia* sp. + *Calligonum* sp.)、麻黄-红砂+白刺+骆驼刺(*Ephedra przewalskii*-*Reaumuria soongorica* + *Nitraria tangutorum* + *Alhagi sparsifolia*)等6个主要植物群丛; (2)对于额济纳荒漠绿洲这一特定的研究区域, 制约群落类型、植被分布格局的主要地下水因子为地下水埋深; (3)对群落产生显著影响的地下水环境因子主要有地下水埋深、pH、盐分、矿化度、电导率、HCO₃⁻等6个变量。DCCA排序图明显反映出排序轴的生态意义, 第1轴突出反映了群落所在环境的地下水埋深, 沿第1轴从右到左, 地下水埋深逐渐增大, 群落的盐分及矿化度亦呈明显的增加趋势, 群丛依次从类型I到VI逐渐演变。额济纳三角洲作为干旱区的荒漠绿洲, 有着明显的特点: 植物群落组成的生物多样性趋于贫乏化和单一化, 生态结构简单, 植被稀疏, 种类单一, 群落覆盖度较低, 群落格局分异明显。地下水埋深变化是群落物种及类型变化的主要原因。

关键词 无偏典范对应分析, 无偏对应分析, 额济纳荒漠绿洲, 地下水环境, 植物群落, 双向指示种分析

Quantitative classification and analysis of relationships between plant communities and their groundwater environment in the Ejin Desert Oasis of China

ZHU Jun-Tao¹, YU Jing-Jie^{1*}, WANG Ping¹, and WANG Zhi-Yong^{1,2}

¹Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; and ²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Aims Ejin Desert Oasis is a typical arid oasis in the Hexi corridor of northwestern and northern China. Water resources in the area have changed since 2000. Our objective was to classify the plant community types and determine the relationship between vegetation and environmental factors in order to evaluate the influence of water regulation on vegetation in this region.

Methods We obtained data on 29 plant species from 151 study plots of natural vegetation of the Ejin Desert Oasis and classified the plant communities by two-way indicators species analysis (TWINSPAN) and correlated them with six groundwater environmental variables using detrended correspondence analysis (DCA) and detrended canonical correspondence analysis (DCCA) ordinations.

Important findings Six plant associations were identified. The main factor correlated to their distribution was groundwater depth, which had more influence on the distribution of plant species and vegetation than other variables because change of groundwater depth leads to changes in both salinity and mineralization. The first ordination axis was correlated with the gradient of groundwater depth, and the second axis was correlated with pH. Compared with other areas, the scarcity of plant species and the differentiation of plant communities were

收稿日期Received: 2010-10-20 接受日期Accepted: 2011-01-28

* 通讯作者Author for correspondence (E-mail: yujj@igsnr.ac.cn)

缩写: DCA, 无偏对应分析; DCCA, 无偏典范对应分析; *Dep*, 地下水埋深; *EC*, 电导率; *IV*, 重要值; *PCA*, 主成分分析; *RDA*, 冗余分析; *SAL*, 盐分; *TDS*, 矿化度; *TWINSPAN*, 双向指示种分析方法。

obvious.

Key words detrended canonical correspondence analysis, detrended correspondence analysis, Ejin Desert Oasis, groundwater environment, plant community, two-way indicators species analysis

20世纪80年代以来,随着生态学理论与应用研究的发展,植被格局研究成为植被生态学研究的重点(Burke, 2001)。数量分析为客观、准确地揭示植被与环境之间的生态关系提供了合理、有效的途径,已成为植被生态学研究的重要内容(江洪等, 1994; 张峰等, 2003)。数量分类和排序可以深刻地揭示植物种、植物群落与环境之间的生态关系(张金屯, 1995)。关于干旱区内陆河流域植被与环境的关系,已有不少研究工作。孙雪新等(1994)对酒泉胡杨(*Populus euphratica*)林进行了数量分类和排序,结果表明,酒泉地区胡杨生长的主要限制因子是地下水位、水矿化度、土壤总盐量及Cl⁻含量,土壤pH值不是影响胡杨生长的主要限制因子;李涛等(2003)的研究表明,制约塔里木河中游天然植被组成和结构的主导环境因子为地下水位、地下水矿化度、地下水酸碱度;Zhang等(2005)的研究表明,制约塔里木河下游天然植被分布的主导环境因子依次为地下水位、土壤含水量、土壤pH值、地下水酸碱度和矿化度;王利兵等(2007)的研究表明,地下水位是所有因子中对植物群落分布起决定性作用的环境因子;桂东伟等(2010)的研究表明,制约群落类型、植物种分布格局的主要因素是海拔、pH值、土壤含水量、土壤有机质、坡度、坡向等6个变量。

在干旱区,水是影响植被分布与变化的最积极、最活跃的生态因素,它的任何微小变化都会在植被上表现出来(周志强等, 2007)。干旱区的植被通常较为稀疏,多呈斑块状分布,且时空变化幅度较大,使干旱环境中的生态系统极为脆弱,加之人类活动的干扰,极易发生荒漠化(Tongway & Ludwig, 1994)。在地植物学研究领域,植物群落和环境因子之间的关系是一个十分重要的内容(江洪等, 1994),影响荒漠植被分布格局的因素包括生物的和非生物的,其间的相互作用关系十分复杂,需要同时反映出诸如地下水、土壤含水量、土壤盐分等环境因子与植被动态的关系,定量地揭示它们之间的相互作用关系具有重要的生态学意义(张元明等, 2004; Zhang *et al.*, 2005)。干旱区存在着依赖于地下水的生态系统,依赖地下水的植被,那么,地下水环境

是如何影响依赖地下水的植被群落分布格局的呢?

额济纳荒漠绿洲,是保护河西走廊、西北,乃至华北地区的天然生态屏障。近几十年来,由于黑河下泄水量减少,河流断流、地下水位下降、水质恶化、植被退化、生物多样性减少、土地沙漠化进程不断加剧。为了恢复和重建黑河下游的生态系统,从2000年开始,实施了应急生态输水工程,流域水资源时空分布发生了重大变化。为了科学地评价和预测生态输水对额济纳荒漠绿洲天然植被的影响,亟需建立植被-环境因子的响应关系。因此,我们对额济纳荒漠绿洲的三横两纵5个断面31处地下水位和盐分监测点的植物群落展开调查,获取了植物群落特征、分布状况及地下水环境数据,并对植物群落进行了双向指示种分析方法(two-way indicators species analysis, TWINSpan)分类和无偏对应分析(detrended correspondence analysis, DCA)、无偏典范对应分析(detrended canonical correspondence analysis, DCCA)排序,得出额济纳荒漠绿洲主要植物群落类型以及影响植被类型变化和分布的主要环境因子,以期为黑河下游的合理调水和额济纳荒漠绿洲的植被恢复和重建提供理论依据。

1 研究区概况

额济纳荒漠绿洲,位于内蒙古自治区西北边境,深居内陆,气候极端干旱,是中国最干旱的地区之一。地理坐标: 97°10′-102°59′ E, 37°52′-43°39′ N,面积约1.22万km²,整体地势由西南向东北逐渐倾斜,海拔900-1100 m,最低处为西居延海,海拔820 m。降水稀少,蒸发强烈,风大沙多,日照时间长,冬季寒冷,夏季炎热。据额济纳旗气象站1957-2003年的资料,年平均气温7.8-8.6℃,多年平均降水量为42 mm,年平均最大降水量为103 mm,最小降水量为7 mm;多年平均蒸发量为3755 mm,最高达4035 mm。蒸发量是降水量的89倍(司建华等, 2005)。

该区植物种类贫乏,据有关调查和统计(刘嫫心, 1985; 马毓泉, 1991),该区植物共49科151属268

种。在49科中,含30种以上的有菊科(81种)、藜科(47种)、禾本科(33种),其他种类较多的科有豆科(15种)、蓼科(11种)、莎草科(11种)、怪柳科(10种),这7科共有208种植物,占该区总种数的72%,是该区植物的优势种。在植被类型上,以旱生、超旱生、耐盐碱的亚洲中部荒漠成分占优势。分布格局上,在沿额济纳河两岸与湖积平原地带,由生长着中生和湿生的乔灌木和草本植物组成河岸疏林灌丛-草甸系统;在绿洲外围的沙漠分布区,主要以各种沙生灌木和草本植物为主,构成怪柳灌丛杂草系统和湖盆梭梭灌丛;在干旱的低山丘陵和广大的戈壁平原,生长着稀疏的耐旱荒漠植被,主要构成戈壁荒漠草场(司建华等,2005)。

2 材料和方法

2010年7–8月,对额济纳荒漠绿洲自然植被进行了调查。对沿输水路线的三横两纵5个断面31处地下水水位和盐分监测点的植物群落进行调查,布设31个样地,调查乔木样方16个,灌木样方87个,草本样方48个,共调查151个样方(样地布设如图1所示)。样地面积为20 m × 20 m,样地位置由全球卫星定位系统GPS确定。在样地内随机选择2个10 m × 10 m的乔木样方,分物种记录高度 ≥ 5 m的乔木的高度、盖度和胸径,同时选择3个5 m × 5 m的灌木样方和3个1 m × 1 m的草本样方,分物种记录灌木的高度、盖度和多度,草本植物的高度和盖度。环境特征调查包括海拔、地下水埋深(*Dep*)等。同时在每一个样地取3个地下水样,带回实验室测定其盐分(*SAL*)、矿化度(*TDS*)、电导率(*EC*)、pH,以及 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 等7种离子的含量。

采用重要值(importance value, *IV*)作为各种植物在群落中的优势度指标,表示不同植物在群落中的功能地位,反映其在群落中的分布格局状况,具体计算公式为:

乔木重要值=(相对密度+相对频度+相对显著度)/300

灌草重要值=(相对密度+相对频度+相对盖度)/300

151个样方共记录29个种,剔除频度小于5%的植物种(Lepš & Šmilauer, 2003),将每个样地的乔灌木重要值取平均,最终得到31 × 20的样地-植物种

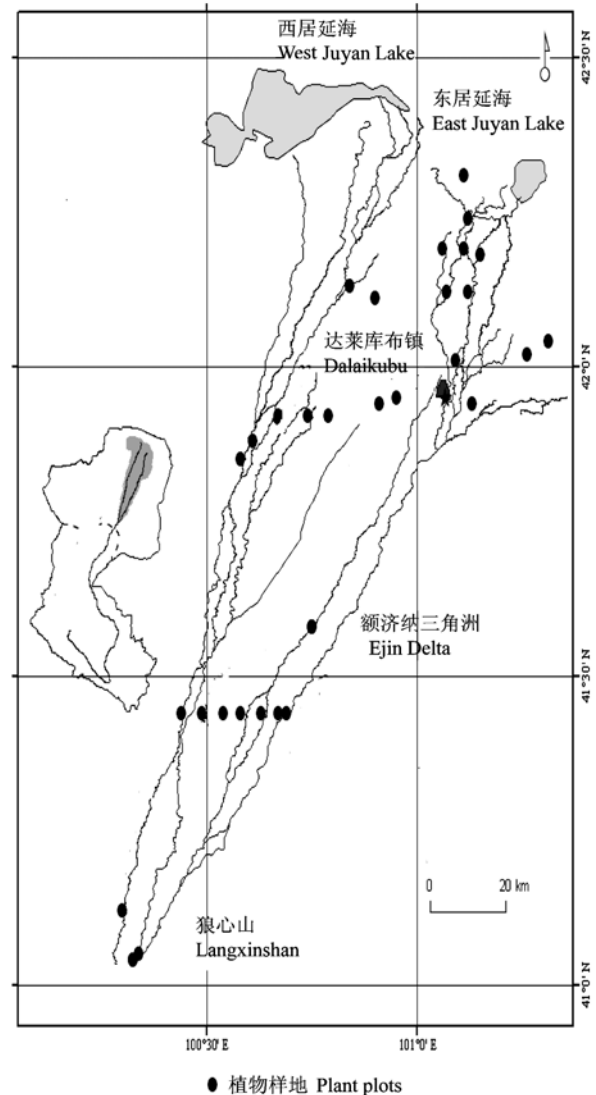


图1 额济纳荒漠绿洲植物样地的布设。
Fig. 1 Distribution of plant plots in Ejin Desert Oasis.

的原始矩阵。环境数据包括12个环境因子,即*Dep*、*SAL*、pH、*TDS*、*EC*、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 等,因而组成31 × 12的样地-环境因子矩阵。

应用TWINSpan对植物群落进行分类,划分出额济纳荒漠绿洲的植物群落类型;采用DCA和DCCA方法对群落进行排序,以研究群落分布格局与地下水环境的关系。DCCA排序着重于研究区域地下水环境梯度(*Dep*、*SAL*),并对DCA和DCCA排序特征值进行比较,用于分析重要的环境因子是否被遗漏(刘光崧,1996)。

冗余变量是对植物群落或植物种分化特征影

响不明显的环境变量, 是产生“弓形效应”的重要原因(Lepš & Šmilauer, 2003; 李国庆等, 2008)。因此, 在研究生境因子对植物群落格局的分异时, 为避免冗余变量的影响, 利用前向选择方法剔除冗余变量, 并选定一组代理变量(proxy variable)进行分析, 同时应用Monte Carlo检验(1 000个置换)检测代理变量和植物群落组成是否存在统计意义上的显著的相关关系(Lepš & Šmilauer, 2003; Franklin *et al.*, 2006)。

上述分析方法中, TWINSpan使用WinTwins 3.2软件包实现; 前向选择、DCA、DCCA排序和Monte Carlo检验均在Ter Braak编制的CANOCO 4.5软件包中实现。

3 结果和分析

3.1 TWINSpan分类

对31个样地(151个样方)进行TWINSpan等级分类, 将TWINSpan分类结果与实际的生态意义相结合, 最终划分为6个主要植物群丛类型(图2, 图3)。

群丛I (计算机编码1)为芦苇+杂类草(Ass. *Phragmites australis* + herbs), 包含样地30和31, 主要分布于额济纳河两侧及地下水较浅的地区, 是由河流、湖泊、沼泽和草甸等景观构成的。该系统的主要植物群落为湿生或盐生草本植物, 主要草本植物有芦苇、芨芨草(*Achnatherum splendens*)、赖草(*Leymus secalinus*)、拂子茅(*Calamagrostis epigeios*)、碱草(*Elymus breviaristatus*)、马蔺(*Kalimeris indica*)等。群丛总盖度高, 通常为70%–90%。

群丛II (计算机编码0111)为胡杨-红柳+杂类草(Ass. *Populus euphratica-Tamarix ramosissima* + herbs), 包含样地3、12、13、21和22, 结合实际的生态意义, 将样地14 (计算机编码0010)归入群丛II, 它主要分布于额济纳东河沿岸、三角洲上与冲积扇的湖盆洼地, 植物群落中胡杨林多呈条状或斑块状沿河岸分布, 林下常有风积沙, 甚至形成沙丘, 沙丘一半生长红柳, 林下生长苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、芦苇、小花棘豆(*Oxytropis glabra*)、花花柴(*Karelinia caspica*)等。群丛总盖度较高, 通常为40%–70%。

群丛III (计算机编码0101)为沙枣-红柳+杂类草(Ass. *Elaeagnus angustifolia-Tamarix ramosissima*

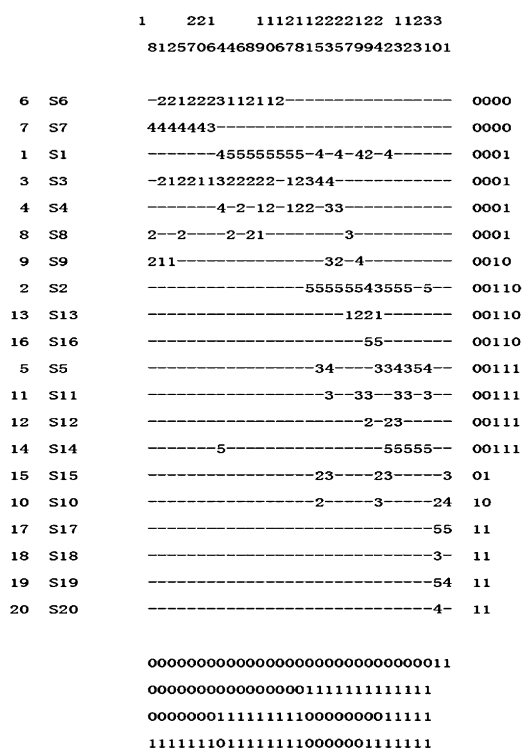


图2 额济纳荒漠绿洲植物群落的双向指示种(TWINSpan)分类结果。S1, 花花柴; S2, 红柳; S3, 白刺; S4, 沙蒿; S5, 苦豆子; S6, 红砂; S7, 麻黄; S8, 沙拐枣; S9, 骆驼刺; S10, 芨芨草; S11, 小花棘豆; S12, 猪毛菜; S13, 雾冰藜; S14, 胡杨; S15, 甘草; S16, 沙枣; S17, 芦苇; S18, 赖草; S19, 拂子茅; S20, 碱草。

Fig. 2 Two-way indicators species analysis (TWINSpan) classification results of plant communities in Ejin Desert Oasis. S1, *Karelinia caspica*; S2, *Tamarix ramosissima*; S3, *Nitraria tangutorum*; S4, *Artemisia* sp.; S5, *Sophora alopecuroides*; S6, *Reaumuria soongorica*; S7, *Ephedra przewalskii*; S8, *Calligonum* sp.; S9, *Alhagi sparsifolia*; S10, *Achnatherum splendens*; S11, *Oxytropis glabra*; S12, *Salsola collina*; S13, *Bassia dasyphylla*; S14, *Populus euphratica*; S15, *Glycyrrhiza uralensis*; S16, *Elaeagnus angustifolia*; S17, *Phragmites communis*; S18, *Leymus secalinus*; S19, *Calamagrostis epigeios*; S20, *Elymus breviaristatus*.

+ herbs), 包含样地19和24, 主要分布于额济纳西河中下游, 灌木占优势, 有怪柳、沙拐枣(*Calligonum* sp.), 伴生草本有苦豆子、甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)、花花柴等。群丛总盖度通常为50%左右。

群丛IV (计算机编码0100)为红柳-杂类草(Ass. *Tamarix ramosissima*-herbs), 包含样地11、15、23、25、27和29, 主要分布于额济纳河的河岸滩, 多沙土、盐化草甸土、盐化灰棕荒漠土, 植物群落以多枝怪柳(*Tamarix ramosissima*)占绝对优势。在盐碱化

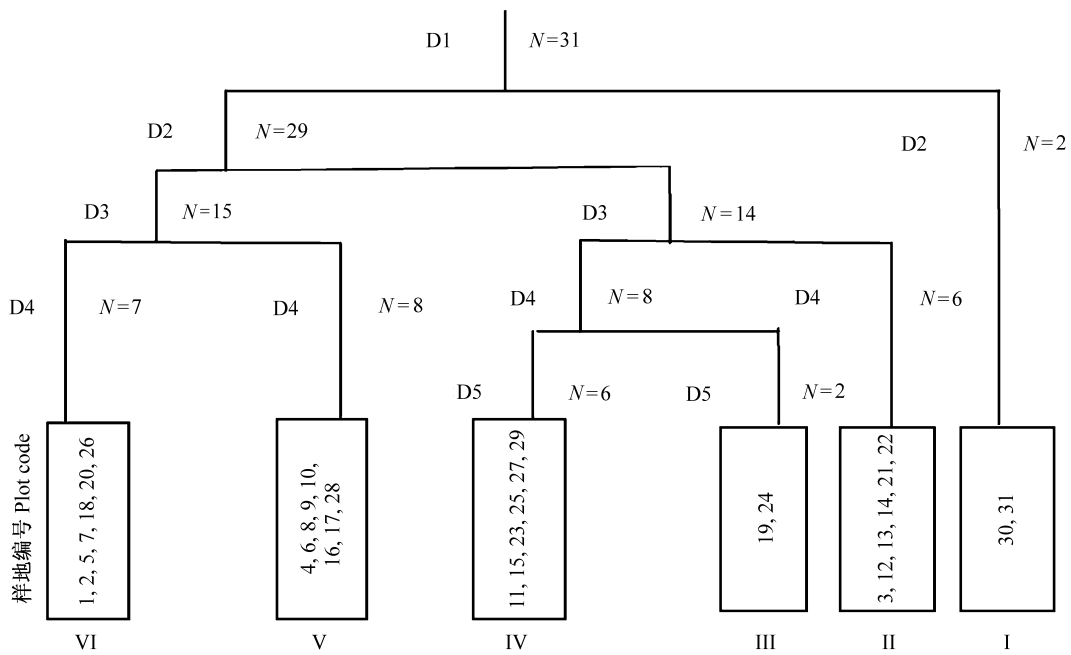


图3 额济纳荒漠绿洲植物群落31个样地(151个样方)的双向指示种(TWINSpan)分类树状图。D, 样地分组; N, 样地数。I, 芦苇+杂类草; II, 胡杨-红柳+杂类草; III, 沙枣-红柳+杂类草; IV, 红柳-杂类草; V, 花花柴-白刺+沙蒿+沙拐枣; VI, 麻黄-红砂+白刺+骆驼刺。

Fig. 3 Dendrogram of two-way indicators species analysis (TWINSpan) classification of 31 plots (151 quadrats) plant communities in Ejin Desert Oasis. D, division of plots; N, number of plots. I, Ass. *Phragmites australis* + herbs; II, Ass. *Populus euphratica-Tamarix ramosissima* + herbs; III, Ass. *Elaeagnus angustifolia-Tamarix ramosissima* + herbs; IV, Ass. *Tamarix ramosissima*-herbs; V, Ass. *Karelinia caspica-Nitraria tangutorum* + *Artemisia* sp. + *Calligonum* sp.; VI, Ass. *Ephedra przewalskii-Reaumuria soongorica* + *Nitraria tangutorum* + *Alhagi sparsifolia*.

程度较重的地段, 常伴生有白刺(*Nitraria tangutorum*)、黑果枸杞(*Lycium ruthenicum*)等; 在沙化程度较重的地段常伴生沙蒿(*Artemisia* sp.)、苦豆子等。群丛总盖度通常为40%–60%。

群丛V (计算机编码0011)为花花柴-白刺+沙蒿+沙拐枣(Ass. *Karelinia caspica-Nitraria tangutorum* + *Artemisia* sp. + *Calligonum* sp.), 包含样地4、6、8、9、10、16、17和28, 主要分布于额济纳绿洲外缘, 是由荒漠植物群落与戈壁等自然景观组成的。植物群落组成简单, 植被盖度较低, 群丛总盖度通常为15%–30%。

群丛VI (计算机编码0001)为麻黄-红砂+白刺+骆驼刺(Ass. *Ephedra przewalskii-Reaumuria soongorica* + *Nitraria tangutorum* + *Alhagi sparsifolia*), 包含样地1、2、5、7、18、20和26, 主要分布于广阔的冲积平原戈壁, 土壤多为荒漠土、沙土和盐土。植物种类单一, 有些地段仅生长一种植物, 甚至完全裸露, 常被砾石和砂砾所覆盖, 植被盖度很低,

一般盖度低于10%。

3.2 DCA排序

先用species-sample (种类-样地)资料进行DCA分析, 看分析结果中梯度长度的第1轴的大小。如果大于4.0, 就应该选单峰模型; 如果在3.0–4.0之间, 那么选单峰和线性模型均可; 如果小于3.0, 那么线性模型(RDA、PCA)的结果要好于单峰模型。DCA分析结果中梯度长度的第1轴值为8.071, 大于4.0, 故选择单峰模型(DCA、DCCA)。

采用DCA对31个样地(151个样方)进行分析, 4个排序轴的特征值分别为0.954、0.411、0.083、0.041, 前2个排序轴的累积贡献率为76.5%。一般情况下, 累积贡献率在70%以上, 则事物的基本面貌可以得到反映(张峰和张金屯, 2000), 说明DCA排序结果良好。其中, 第1轴特征值最大, 反映出最多的生态信息, 第2轴次之, 因此, 根据前两个排序轴做出二维排序图(图4)。TWINSpan分类所得各群丛类型与DCA排序结果基本吻合, 6个群丛的分类结果对额

济纳荒漠绿洲植被群落进行了客观的划分。

从排序轴看, 群丛主要沿着第1轴表现出明显的梯度变化, 分别对应沼泽草甸、荒漠河岸乔木林、荒漠河岸灌木林、荒漠旱生灌木及荒漠戈壁超旱生灌木等植被类型, 表明第1轴代表着*Dep*和*SAL*的变化。即DCA第1轴从右到左, *Dep*逐渐增大, 相应的, 地下水*SAL*也发生变化, 植物群丛逐渐由沼泽草甸过渡到荒漠戈壁; 沿第2排序轴, 群丛I、III、V、VI基本位于同一水平线, 其pH值亦呈现此趋势, 群丛IV的pH值最大, 群丛II的pH值最小, 因此DCA第2轴主要反映地下水pH值的变化。

从植物群丛的类型来分析, 各群丛类型在排序图的分布呈现一定的规律性: 6个群丛由右到左依次变化, I和IV、V、VI分布在排序图的两端, II和III分布在排序图的中央, 其中群丛I、III、VI相距较远, 说明这些群丛在物种组成、环境梯度等方面差异较大; 群丛II和III同属于荒漠河岸乔木, 群丛组成和生境条件差异最小, 群丛IV中由于已经出现荒漠旱生成分, 同群丛V和VI生境条件之间的差别相对缩小, 因此相距较近, 且主要分布在排序图左端。

各群丛从优势植物种在DCA种类排序图中的分布如图5所示, 可以看出: 群丛优势种的分布格局与群丛类型的分布格局基本相似, 如以芦苇和芨芨草(S17和S10)为优势种的群丛I同芦苇和芨芨草均分布于DCA排序图的最右端, 其他优势种同对应群丛在DCA排序图的分布位置也基本相似。

3.3 地下水环境对植物群落格局的影响

在选定的12个地下水环境变量中, 为消除冗余变量的影响, 首先利用前向选择结合Monte Carlo检验确定一组代理变量(Lepš & Šmilauer, 2003; Franklin *et al.*, 2006)。在前向选择过程中, 通过Monte Carlo检验确定各环境变量的边际影响(marginal effects)及条件影响(conditional effects), 深入了解各环境变量同群落之间统计上的相关关系(Lepš & Šmilauer, 2003)。表1是12个环境变量在前向选择过程中在Monte Carlo检验下的边际影响及条件影响变化状况。

边际影响反映了该环境变量对群落物种组成的影响状况; 条件影响是剔除前变量后, 该变量对群落的影响状况, 边际影响及条件影响用典范特征值(Lambda)来表示(Lepš & Šmilauer, 2003)。*Dep*环境变量对群落影响最大(特征值为0.86) (表1), 其

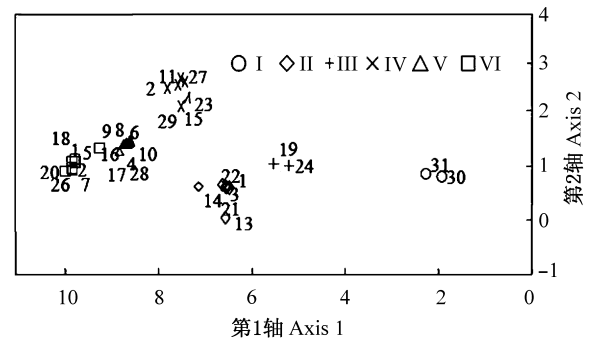


图4 额济纳荒漠绿洲31个样地的无偏对应分析二维排序图。1-31是样地编号。I, 芦苇+杂类草; II, 胡杨-红柳+杂类草; III, 沙枣-红柳+杂类草; IV, 红柳-杂类草; V, 花花柴-白刺+沙蒿+沙拐枣; VI, 麻黄-红砂+白刺+骆驼刺。

Fig. 4 Two-dimensional detrended correspondence analysis (DCA) ordination diagram of 31 plots in Ejin Desert Oasis. 1-31 represent plot codes. I, Ass. *Phragmites australis* + herbs; II, Ass. *Populus euphratica*-*Tamarix ramosissima* + herbs; III, Ass. *Elaeagnus angustifolia*-*Tamarix ramosissima* + herbs; IV, Ass. *Tamarix ramosissima*-herbs; V, Ass. *Karelinia caspica*-*Nitraria tangutorum* + *Artemisia* sp. + *Calligonum* sp.; VI, Ass. *Ephedra przewalskii*-*Reaumuria soongorica* + *Nitraria tangutorum* + *Alhagi sparsifolia*.

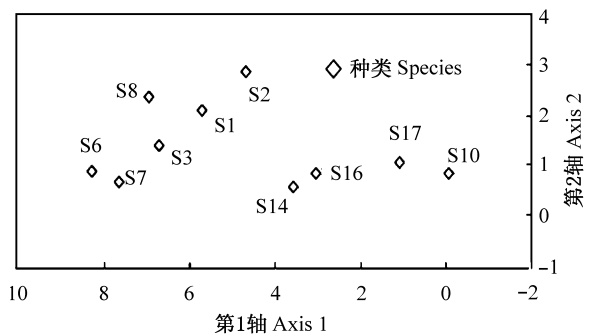


图5 额济纳荒漠绿洲主要植物种的无偏对应分析二维排序图。S1, 花花柴; S2, 红柳; S3, 白刺; S6, 红砂; S7, 麻黄; S8, 沙拐枣; S10, 芨芨草; S14, 胡杨; S16, 沙枣; S17, 芦苇。

Fig. 5 Two-dimensional detrended correspondence analysis (DCA) ordination diagram of the main plant species in Ejin Desert Oasis. S1, *Karelinia caspica*; S2, *Tamarix ramosissima*; S3, *Nitraria tangutorum*; S6, *Reaumuria soongorica*; S7, *Ephedra przewalskii*; S8, *Calligonum* sp.; S10, *Achnatherum splendens*; S14, *Populus euphratica*; S16, *Elaeagnus angustifolia*; S17, *Phragmites communis*.

边际影响最高, 因此也排在条件影响变量中的第1位。*SAL*的边际影响排在第2位, 但Monte Carlo检验在提出*Dep*这一变量后, 其条件影响立即降到0.35, 反映出*SAL*同*Dep*存在很强的相关性。其余环境因子

表1 前向选择中各变量的边际影响和条件影响

Table 1 Marginal and conditional effects of each variable obtained from the forward selection

边际影响 Marginal effects		条件影响 Conditional effects		p值 p value	r值 r value	F值 F value
环境因子 Environment factor	特征值 Eigenvalue	环境因子 Environment factor	特征值 Eigenvalue			
地下水埋深 Groundwater depth	0.86	地下水埋深 Groundwater depth	0.86	0.002**	0.27	8.49
盐分 Salinity	0.85	pH	0.71	0.002**	0.23	8.12
矿化度 Total dissolved solids	0.79	盐分 Salinity	0.35	0.002**	0.11	3.15
电导率 Electric conductivity	0.78	矿化度 Total dissolved solids	0.31	0.005**	0.06	3.41
pH	0.75	电导率 Electric conductivity	0.27	0.036*	0.06	1.58
HCO ₃ ⁻	0.64	HCO ₃ ⁻	0.18	0.032*	0.05	1.98
SO ₄ ²⁻	0.64	Ca ²⁺	0.12	0.226		1.29
Na ⁺	0.61	Na ⁺	0.11	0.318		1.13
Ca ²⁺	0.52	SO ₄ ²⁻	0.08	0.284		1.23
Mg ²⁺	0.35	Cl ⁻	0.08	0.698		0.62
Cl ⁻	0.18	Mg ²⁺	0.07	0.682		0.67
K ⁺	0.07	K ⁺	0.06	0.716		0.64

**，环境因子对群落物种组成的影响极显著($p < 0.01$); *，环境因子对群落物种组成的影响显著($p < 0.05$)。

**，the impact of environment factors on community types is significant at $p < 0.01$ level; *, the impact of environment factors on community types is significant at $p < 0.05$ level.

表2 各群丛环境代理变量的变化特征

Table 2 Variation characteristics of environmental proxy variables of each association

群丛类型 Association type	地下水埋深 Groundwater depth (m)	pH值 pH value	盐分 Salinity (%)	矿化度 Total dissolved solids (mg·L ⁻¹)	电导率 Electric conductivity (μs·cm ⁻¹)	HCO ₃ ⁻ (mg·L ⁻¹)
I	1.10–1.85	7.22–7.42	1.32–1.65	583.15–753.85	635.72–894.25	114.37–146.52
II	2.28–3.56	7.38–7.80	1.80–2.52	947.64–1385.37	856.21–1285.36	173.85–233.42
III	2.33–4.25	7.32–7.65	1.75–2.30	665.42–1063.55	774.55–1095.36	135.25–196.73
IV	2.81–5.15	7.46–7.90	2.41–3.25	1223.58–1745.26	1130.83–2216.15	201.36–347.70
V	3.32–5.54	7.55–8.25	3.15–3.87	1574.54–2512.75	1578.86–2653.24	279.09–382.15
VI	4.25–6.86	7.64–9.29	3.70–5.15	1885.35–3643.71	2156.33–3497.56	315.48–457.50

I, 芦苇+杂类草; II, 胡杨-红柳+杂类草; III, 沙枣-红柳+杂类草; IV, 红柳-杂类草; V, 花花柴-白刺+沙蒿+沙拐枣; VI, 麻黄-红砂+白刺+骆驼刺。

I, Ass. *Phragmites australis* + herbs; II, Ass. *Populus euphratica*-*Tamarix ramosissima* + herbs; III, Ass. *Elaeagnus angustifolia*-*Tamarix ramosissima* + herbs; IV, Ass. *Tamarix ramosissima*-herbs; V, Ass. *Karelinia caspica*-*Nitraria tangutorum* + *Artemisia* sp. + *Calligonum* sp.; VI, Ass. *Ephedra przewalskii*-*Reaumuria soongorica* + *Nitraria tangutorum* + *Alhagi sparsifolia*.

在提出Dep因子后，条件影响值也均出现大幅下降，表明各因素同Dep也存在很强的相关性。尽管如此，pH、SAL、TDS、EC、HCO₃⁻等6个环境因子仍然在前向选择过程中通过Monte Carlo检验($p < 0.05$)。这6个环境因子通过检验构成代理变量，共提取了78%的环境信息量，其中Dep提供最多的信息量(27%) (表1)。

DCCA是分析植被-环境关系最先进的多元分析技术，是一种限定性排序，可以有效地消除“弓形效应”，且能结合植被数据和环境来计算排序值，更利于解释排序轴的生态意义，成为现代植被梯度

分析与环境解释的趋势性方法(Zhang & Oxley, 1994; 沈泽昊等, 2000)。确定6个代理变量后，采用DCCA排序方法研究植被格局与环境的关系(图6)。DCCA前两个排序轴的特征值为0.925和0.247，贡献率分别为59.5%和17.8%，前两轴的累积贡献率为0.773，即前两轴可以代表77.3%的环境信息量，说明排序结果良好。其中，环境因子用箭头表示，箭头所处的象限表示环境因子与排序轴间的正负相关性，箭头连线的长度代表着某个环境因子与群落分布和种类分布间相关程度的大小，连线越长，相关性越大；反之越小。箭头连线和排序轴的夹角代

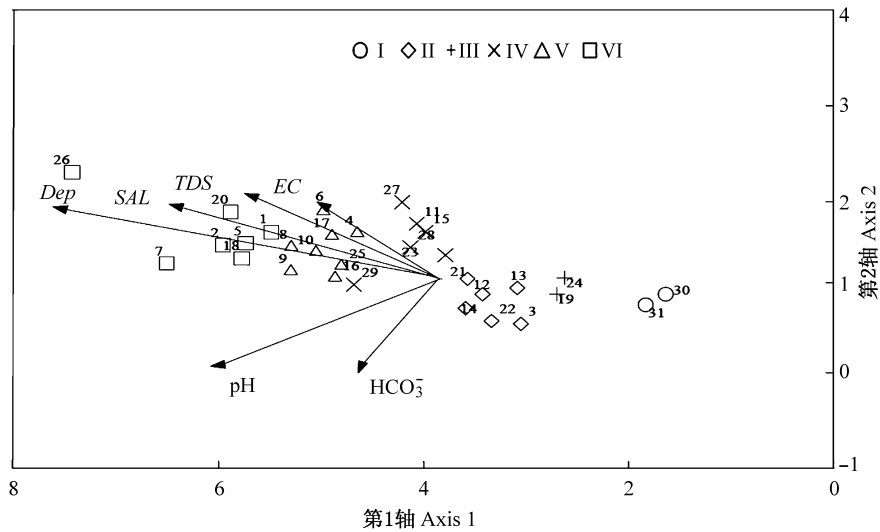


图6 额济纳荒漠绿洲31个样地的无偏典范对应分析二维排序图。Dep, 地下水埋深; EC, 电导率; SAL, 盐分; TDS, 矿化度。1-31是样地编号。I, 芦苇+杂类草; II, 胡杨-红柳+杂类草; III, 沙枣-红柳+杂类草; IV, 红柳-杂类草; V, 花花柴-白刺+沙蒿+沙拐枣; VI, 麻黄-红砂+白刺+骆驼刺。

Fig. 6 Two-dimensional detrended canonical correspondence analysis (DCCA) ordination diagram of 31 plots in Ejin Desert Oasis. Dep, groundwater depth; EC, electric conductivity; SAL, salinity; TDS, total dissolved solids. 1-31 represent plot codes. I, Ass. *Phragmites australis* + herbs; II, Ass. *Populus euphratica*-*Tamarix ramosissima* + herbs; III, Ass. *Elaeagnus angustifolia*-*Tamarix ramosissima* + herbs; IV, Ass. *Tamarix ramosissima*-herbs; V, Ass. *Karelinia caspica*-*Nitraria tangutorum* + *Artemisia* sp. + *Calligonum* sp.; VI, Ass. *Ephedra przewalskii*-*Reaumuria soongorica* + *Nitraria tangutorum* + *Alhagi sparsifolia*.

表着某个环境因子与排序轴相关性的大小, 夹角越小, 相关性越高; 反之相关性越低(张峰和张金屯, 2000)。

DCCA排序图第1轴反映了植物群丛所在环境的Dep, 第2轴主要同pH有关。不难看出, Dep是所有因子中对植物群丛分布起决定性作用的因子。随着Dep的增大, 群丛的SAL和地下水化学特征发生明显变化, SAL及TDS呈明显增加态势, 群丛分布格局也主要沿着第1轴从右到左, 群丛依次从类型I到VI逐渐演变。群丛I、II、VI各样方pH值变化相对较大, 因此在第2轴出现差异。DCCA和DCA排序图总体上具有明显的相似性, 但DCCA排序图群丛的分布格局更加紧凑, 而DCA排序图6个群丛分布相对集中且界线明显。表2为各群丛环境代理变量的变化状况。

4 讨论

采用TWINSpan分类, 将额济纳荒漠绿洲31个植被样地划分为6个主要植物群丛, 分别为芦苇+杂类草、胡杨-红柳+杂类草、沙枣-红柳+杂类草、红柳-杂类草、花花柴-白刺+沙蒿+沙拐枣、麻黄-红砂

+白刺+骆驼刺, 依次对应于沼泽草甸、荒漠河岸乔木林、荒漠河岸灌木林、荒漠旱生灌木及荒漠戈壁超旱生灌木等植被类型, 划分结果很好地反映了群落植被类型的变化趋势。本研究扩展了王利兵等(2007)对河岸胡杨天然植被的数量分类范围, 从区域尺度上探讨了额济纳荒漠绿洲的植被类型。对植被的分类定性地反映了植被类型与环境的关系。额济纳荒漠绿洲属于暖温带大陆干旱气候, 地带性植被类型为荒漠, 由于受黑河上游来水的影响, 出现了隐域植被, 如盐生草甸、沼泽以及该地区特有的胡杨和沙枣林景观, 形成隐域性的森林。

TWINSpan分类所得各群丛类型与DCA排序结果基本吻合, 6个群丛的分类结果客观地对额济纳荒漠绿洲植被群落进行了划分, 验证了TWINSpan分类结果的合理性; 在二维排序图上各群丛类型之间体现出明确的分布范围和界线, 与前人的研究结果基本一致, 说明DCA排序能很好地反映出各植物群落之间及群落与环境之间的关系(张峰等, 2003; 桂东伟, 2010)。各群丛优势种的分布格局与群丛类型的分布格局基本相似, 如以芦苇和芨芨草(S17和S10)为优势种的群丛I, 同芦苇和芨芨草

均分布于DCA排序图的最右端,其他优势种对应群丛在DCA排序图分布位置也基本相似,说明优势植物种的分布格局在一定程度上决定着植物群落类型的分布格局(张峰等,2003)。

DCA排序研究表明,对于特定的研究区域额济纳荒漠绿洲,制约植物群落类型、植物种分布格局的主要地下水环境因子是 Dep 。王利兵等(2007)应用TWINSPAN和DCCA对额济纳河岸胡杨林进行了分类和排序,结果也表明, Dep 是所有因子中对河岸植物群落分布起决定性作用的环境因子。另外,其他学者在干旱区内陆河流域植被与环境关系的研究中,也得到类似的结论(孙雪新等,1994;李涛等,2003;Zhang *et al.*, 2005)。

在植被与环境关系的研究中,并不是环境因子越多越好,因为环境因子之间存在着复杂的相互关系,甚至是共线性关系(李国庆等,2008),并且存在很多的冗余部分,会对分析结果造成误差。因此,要选择对群落格局有决定意义的环境变量用于群落与环境关系的研究。有人使用相关系数法来去除冗余的环境变量(李涛等,2003),也有人使用主分量分析(PCA)的方法避免共线性问题(钱亦兵等,2004;刘万德等,2010)。而使用前向选择法和Monte Carlo显著性检验,能准确高效地确定对群落影响显著的环境因子,同时排除存在共线性的环境因子(桂东伟等,2010)。本研究对群落分布格局的12个地下水环境因子使用前向选择法,提取 Dep 、pH、SAL、TDS、EC、 HCO_3^- 等6个对群落产生显著影响的环境因子作为代理变量。代理变量总共提取了78%的环境信息量,其中的 Dep 解释量最多,达到27%。在进一步的验证中,也表明了代理变量选择的合理性。说明前向选择法结合Monte Carlo检验是研究植被格局的一种较为可靠、实用性强的方法(桂东伟等,2010)。在利用6个代理变量对植物样地进行DCCA分析中,DCCA和DCA排序图总体上具有明显的相似性,但DCCA排序图群丛的分布格局更加紧凑,而DCA排序图6个群丛分布相对集中且界线明显。第1轴 Dep 的变化仍然是群落物种及格局变化的主要因子;群落内pH值的变化使得部分样地在第2轴出现分异。代理变量中的其他4个环境因子对群落格局的影响相对较弱,从其条件影响及DCCA排序图中也可以看出这一点(桂东伟等,2010)。

Zhang等(2005)的研究表明,影响荒漠植被分

布格局的因素包括生物的和非生物的,其间的相互作用关系十分复杂,需要同时反映出诸如地下水、土壤含水量、土壤盐分等环境因子与植被动态的关系,定量地揭示它们之间相互作用的关系。本研究仅从地下水环境因子(诸如 Dep 、SAL和TDS等)来探讨荒漠植被分布格局与环境的关系,在一定程度上解释了依赖地下水的植被与地下水环境的关系,但在今后的研究中还需加强土壤环境解释方面的研究。

总之,作为干旱区的荒漠绿洲,额济纳三角洲有着明显的特点:植物群落组成的生物多样性趋于贫乏化和单一化,生态结构简单,植被稀疏,种类单一,群落覆盖度较低,群落格局分异明显, Dep 变化是群落物种及类型变化的主要原因。

致谢 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB-421305)、国家自然科学基金(91025023)资助。感谢张一驰博士、毛丽丽博士、闵雷雷博士,敖菲、徐永亮、宋闰柳等研究生在野外实验和文章写作方面所给予的大力帮助。

参考文献

- Burke A (2001). Classification and ordination of plant communities of the Naukluft mountains, Namibia. *Journal of Vegetation Science*, 12, 53–60.
- Franklin J, Wiser SK, Drake DR, Burrows LE, Sykes WR (2006). Environment, disturbance history and rain forest composition across the islands of Tonga, Western Polynesia. *Journal of Vegetation Science*, 17, 233–244.
- Gui DW (桂东伟), Lei JQ (雷加强), Zeng FJ (曾凡江), Jiang Y (江源), Mu GJ (穆桂金), Yang FX (杨发相) (2010). Effect of ecological factors on plant communities of the Cele River Basin on the north slope of the middle Kunlun mountains. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 19, 38–46. (in Chinese with English abstract)
- Jiang H (江洪), Huang JH (黄建辉), Chen LZ (陈灵芝), Yang ZY (杨朝阳) (1994). DCA ordination, quantitative classification and environment interpretation of plant communities in Dongling Mountain. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 36, 539–551. (in Chinese with English abstract)
- Lepš L, Šmilauer P (2003). *Multivariate Analysis of Ecological Data Using CANOCO*. Cambridge University Press, New York. 202–210.
- Li GQ (李国庆), Wang XA (王孝安), Guo H (郭华), Zhu ZH (朱志红) (2008). Effects of ecological factors on plant communities of Ziwuling Mountain, Shaanxi Province. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 28, 2463–2471. (in Chinese with English abstract)

- Li T (李涛), Yin LK (尹林克), Yan C (严成) (2003). Quantitative classification and ordination analysis on vegetation in the middle reaches of Tarim River. *Arid Land Geography* (干旱区地理), 26, 173–179. (in Chinese with English abstract)
- Liu GS (刘光崧) (1996). *Soil Physical and Chemical Analysis and Description of Soil Profiles* (土壤理化分析与剖面描述). Standards Press of China, Beijing. 50–112. (in Chinese)
- Liu MX (刘嫖心) (1985). *Flora in Deserti Reipublicae Populorum Sinarum* (中国沙漠植物志), Tomus 1. Science Press, Beijing. 242–283. (in Chinese)
- Liu WD (刘万德), Ding Y (丁易), Zang RG (臧润国), Su JR (苏建荣), Yang M (杨民), Cai DL (蔡笃磊), Li RC (李儒财), Chen SW (陈少伟) (2010). Quantitative classification and ordination of low-altitudinal tropical forests in Bawangling, Hainan Island. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 29, 1526–1532. (in Chinese with English abstract)
- Ma YQ (马毓泉) (1991). *Flora of Inner Mongolia* (内蒙古植物志), Tomus 2. Inner Mongolia People's Publishing House, Hohhot. 126–145. (in Chinese)
- Qian YB (钱亦兵), Wu ZN (吴兆宁), Zhang LY (张立运), Shi QD (师庆东), Jiang J (蒋进), Tang LS (唐立松) (2004). Impact of ecoenvironment on vegetation community pattern in Gurbantungut Desert. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 59, 895–902. (in Chinese with English abstract)
- Shen ZH (沈泽昊), Zhang XS (张新时), Jin YX (金义兴) (2000). Gradient analysis of the influence of mountain topography on vegetation pattern. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 24, 430–435. (in Chinese with English abstract)
- Si JH (司建华), Feng Q (冯起), Zhang XY (张小由), Su YH (苏永红), Zhang YW (张艳武) (2005). Vegetation changes in the lower reaches of the Heihe River after its water import. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物学报), 25, 631–640. (in Chinese with English abstract)
- Sun XX (孙雪新), Li Y (李毅), Kang XY (康向阳) (1994). The quantitative classification and the ordination of *Populus euphratica* Oliv's natural forest stand in Jiuquan. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (干旱区资源与环境), 8, 61–67. (in Chinese with English abstract)
- Tongway DJ, Ludwig JA (1994). Small-scale resource heterogeneity in semi-arid landscapes. *Pacific Conservation Biology*, 1, 201–208.
- Wang LB (王利兵), Yu WL (余伟莅), Yang WB (杨文斌), Hu XL (胡小龙), Li GT (李钢铁), Li JT (李佳陶) (2007). The quantitative classification and ordination of natural vegetation *Populus euphratica* Oliv. forests growing on the banks of Ejina River. *Journal of Northwest Forestry University* (西北林学院学报), 22, 45–48. (in Chinese with English abstract)
- Zhang F (张峰), Zhang JT (张金屯) (2000). Research progress of numerical classification and ordination of vegetation in China. *Journal of Shanxi University (Natural Science Edition)* (山西大学学报(自然科学版)), 23, 278–282. (in Chinese with English abstract)
- Zhang F (张峰), Zhang JT (张金屯), Zhang F (张峰) (2003). Pattern of forest vegetation and its environmental interpretation in Zhuweigou, Lishan Mountain Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 23, 421–427. (in Chinese with English abstract)
- Zhang JT (张金屯) (1995). *Methods of Vegetation Quantitative Ecology* (植被数量生态学方法). Science and Technology Press of China, Beijing. 217–226. (in Chinese)
- Zhang JT, Oxley ERB (1994). A comparison of three methods of multivariate analysis of upland grasslands in North Wales. *Journal of Vegetation Science*, 5, 71–76.
- Zhang YM (张元明), Chen YN (陈亚宁), Zhang XL (张小雷) (2004). Plant communities and their interrelations with environmental factors in the lower reaches of Tarim River. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 59, 903–910. (in Chinese with English abstract)
- Zhang YM, Chen YN, Pan BR (2005). Distribution and floristics of desert plant communities in the lower reaches of Tarim River, southern Xinjiang, People's Republic of China. *Journal of Arid Environments*, 63, 772–784.
- Zhou ZQ (周志强), Wei XX (魏晓雪), Liu T (刘彤) (2007). The numerical classification of desert vegetation and soil interpretation in Qitai County, Xinjiang. *Biodiversity Science* (生物多样性), 15, 264–270. (in Chinese with English abstract)

责任编辑: 张金屯 责任编辑: 王 葳