

新疆塔里木河下游土壤特性及其对物种多样性的影响

杨玉海^{1,2}, 陈亚宁^{1,*}, 李卫红¹

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:结合塔河下游大西海子至台特玛湖区段的 8 个地下水监测断面、31 个土壤剖面的 217 个土样分析数据,利用非参数检验、单因素方差分析和灰色关联方法,分析了塔河下游土壤特性及其对物种多样性变化的影响。研究表明,塔河下游土壤除全磷外,有机质等指标存在垂直分布差异,出现显著差异的土层深度为 50cm。塔河下游上段的土壤养分含量相对较高,下段较低;物种多样性指数自上段至下段的下降趋势与有机质等的变化相同,而植物群落退化则表现为从复合群落到单一群落的演变趋势,即从乔(胡杨为主)、灌(柽柳为主)、草复合群落演变到单一的柽柳灌丛群落。灰色关联分析表明塔河下游上层(0~50cm)土壤有机质、全氮、全磷、全钾含量与物种多样性的相关性较高。塔河下游土壤有机质、全氮、全磷、全钾等在一定程度上对物种多样性变化有一定影响。

关键词:塔里木河;土壤特性;多样性;灰关联

文章编号:1000-0933(2008)02-0602-10 中图分类号:Q142,Q145,Q16 文献标识码:A

Soil properties and their impacts on changes in species diversity in the lower reaches of Tarim River, Xinjiang, China

YANG Yu-Hai^{1,2}, CHEN Ya-Ning^{1,*}, LI Wei-Hong¹

1 *Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China*

2 *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 0602 ~ 0611.

Abstract: Based on the data of soil physical and chemical characteristics from 217 soil samples collected from 31 soil profiles located in eight monitoring sections in the lower reaches of Tarim River, southern Xinjiang, we analyzed the spatial patterns of soil properties using non-parametric method or ANOVA, and examined the differences in soil quality between monitoring sections by cluster analysis. The relationship between plant species diversity and soil factors was also examined by using grey correlation analysis. Results indicate that the measured soil properties, including the organic matter, total N, and total K varied vertically among different soil layers with exception of the total P, with significant differentiation at 50cm soil depth. Based on soil quality, the lower reaches of Tarim River are generally differentiated between the upper sections and the lower sections, with the content of nutrients in soils of the upper parts being greater than in the lower parts. Along the environmental gradients of the different monitoring sections located 150m away from the river course of the lower reaches of Tarim River (namely from upper to the lower sections), plant species diversity indices displayed the same pattern of descending gradient as soil organic matter. Moreover, plant communities showed a change from mixed-species communities

基金项目:中国科学院知识创新资助项目(KZCX2-XB2-03);国家自然科学基金资助项目(90502004);国家支撑资助项目(2006BAC01A03)

收稿日期:2006-12-05; **修订日期:**2007-09-25

作者简介:杨玉海(1972~),女,新疆人,博士生,主要从事干旱区资源与环境研究. E-mail: yangyuhai1689@163.com

* **通讯作者** Corresponding author. E-mail: chenyn@ms.xjb.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by the Knowledge innovation project of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX2-XB2-03), the National Natural Science Foundation of China (No. 90502004) and the National Science and Technology Support Plan (No. 2006BAC01A03)

Received date: 2006-12-05; **Accepted date:** 2007-09-25

Biography: YANG Yu-Hai, Ph. D. candidate, mainly engaged in arid resource and environment. E-mail: yangyuhai1689@163.com

to single-species community corresponding to the changes of plant species diversity indices, i. e. from the communities composed of arbor (*Populus euphratica*), shrub (*Tamarix* spp.) and mixture of herbage to pure *Tamarix* community. Grey correlation analysis indicates that there exist significant relationships of plant species diversity with soil organic matter, total N, total P, and total K in the 0–50cm soil layer, suggesting that changes in these soil factors could reflect changes in plant species diversity to certain extent in the lower reaches of Tarim River.

Key Words: Tarim River; soil property; diversity; grey correlation

在生态系统中,土壤和植被是相互依存的两个因子,植被影响土壤,土壤制约植被。一方面,土壤中贮存着大量的碳、氮、磷等营养物质;另一方面,土壤养分有效性对植物的生长和发育起着关键的作用,并直接影响着植物群落的组成与生理活力,决定着生态系统的结构、功能和生产力水平^{[1][2]}。研究表明,在生态演替过程中植物组成变化能够反映环境条件梯度的变化,如从演替早期的高光照/低养分到后期的低光照/高养分的变化^[3]。许多理论学说虽然支持在生态演替过程中土壤有效养分会发生变化的观点,但对这种变化的趋势和意义的认识存在分歧。因此,土壤因子与植物之间关系的研究是生态学家关注的热点之一。

近 50a 来,塔里木河流域内的水土开发活动强度不断加大,尤其是上中游的水资源的重新分配,使下游地区的来水骤减,大西海子以下河道于 20 世纪 70 年代开始断流,在地表水供水中断,区域又无其它水源补给及蒸发强烈的条件下,下游区地下水位下降,植被衰退,土地沙漠化急剧发展,下游河道干涸,胡杨林及灌木大量死亡,绿色走廊不断衰退,生态环境问题日趋严峻。塔里木河的生态环境问题已引起众多学者的关注并对其进行研究。许多学者从不同角度出发分析了塔里木河水资源开发过程中的经济与生态的关系^[4],探讨了生态退化与保护对策^[5],同时通过地下水的变化来研究生物多样性的变化及其之间的关系^[6],分析植物群落分布与衰退演替趋势^[7]。以往对塔里木河下游土壤与植被之间关系的研究主要应用排序分析方法(对应分析和典范对应分析)研究土壤含水量、pH、总盐等因子在植物群落分布格局中的作用^[8-9],而针对植被分布、物种多样性与土壤因子之间相关性的研究则相对较少。因此,本文利用塔河下游物种多样性监测资料与相应地区的土壤分析结果,在分析研究塔河下游植被退化过程中土壤特性的变化规律的基础上,应用灰色关联分析方法探讨土壤因子与物种多样性的关系,确定影响物种多样性的主要土壤因子,旨在为塔河下游生态恢复提供科学依据。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

塔里木河位于我国新疆维吾尔自治区的南部,全长 2637km。其中塔里木河下游段系指从恰拉至台特玛湖的河段,全长 428km,主要位于罗布泊微弱拗陷区,构造稳定,第四纪沉积物厚约 350m,沉积物以粘土质的河湖相沉积物为主;地形平坦,区内年平均降水量 17.4~42.0mm,年蒸发量(潜势)平均为 2500~3000mm,属大陆性暖温带极端干旱气候,生态环境极为脆弱。由于塔里木河下游段东侧为库鲁克沙漠,西侧为塔克拉玛干沙漠,两大沙漠之间为塔里木河下游冲积平原,在这里生长的自然植被与周围环境形成鲜明对照,因此这一廊道性植被带又被称为“绿色走廊”^[10]。植被组成以杨柳科、柽柳科、豆科、夹竹桃科、禾本科等植物为主,形成乔木、灌木和草本植物的复合群落。乔木主要有胡杨(*Populus euphratica*),灌木主要有柽柳(*Tamarix* spp)、黑刺(*Lycium ruthenicum*)、铃铛刺(*Halimodendron halodendron*)等,草本植物主要有芦苇(*Phragmites communis*)、大花罗布麻(*Poacynum hendersonii*)、疏叶骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)、花花柴(*Karelinia caspica*)、胀果甘草(*Glycyrrhiza inflata*)等,由于河道的长期断流而生长极为衰败。其中多枝柽柳(*Tamarix ramosissima*)、刚毛柽柳(*Tamarix hispida*)、长穗柽柳(*Tamarix elongat*)等是构成柽柳灌丛的优势种。

1.2 样地选择及土样采集

2005 年 7 月,在塔里木河下游的大西海子至台特玛湖这一区段内,沿地下水监测断面选择亚哈甫马汗

(B)、英苏(C)、阿布达勒(D)、喀尔达依(E)、阿拉干(F)和依干不及麻(G)等 8 个具有代表性的断面作为取样地点(图 1)。依据不同断面植物群落的种类组成差别,在各监测断面沿垂直于河道的方向设置植物样地。其中选取各断面距离河道距离分别为 150、300、500m 处样地作为研究对象,共有样地 23 个,其中考干只有 2 个样地,其余断面均为 3 个样地。样地大小为 50m × 50m,在每个样地中,再以 25m 为间隔设置 4 个 25m × 25m 的样方,记录每种乔木(或灌木)的个体数、盖度、胸径、基径、高度、冠幅等指标;同时,在每个样方内设置 4 个 5m × 5m 的小样方,记录每种草本植物的个体数、盖度、高度等指标,并以 GPS 进行定位,记录每个样地的海拔高度、经纬度及各样地的地下水位埋深等。同时,在每个样地内挖 1 个土壤剖面,其中英苏、喀尔达依断面距河道 300、500m 处各挖 3 个剖面,共 31 个土壤剖面。每个剖面分层自下而上采集 0 ~ 5、5 ~ 15、15 ~ 30、30 ~ 50、50 ~ 80、80 ~ 120、120 ~ 170cm 土层土样各一个,每个土样由相应土层多点采样混合而成,同时每个土层都用铝盒采土样,现场称湿重,用烘干法测土壤含水量。

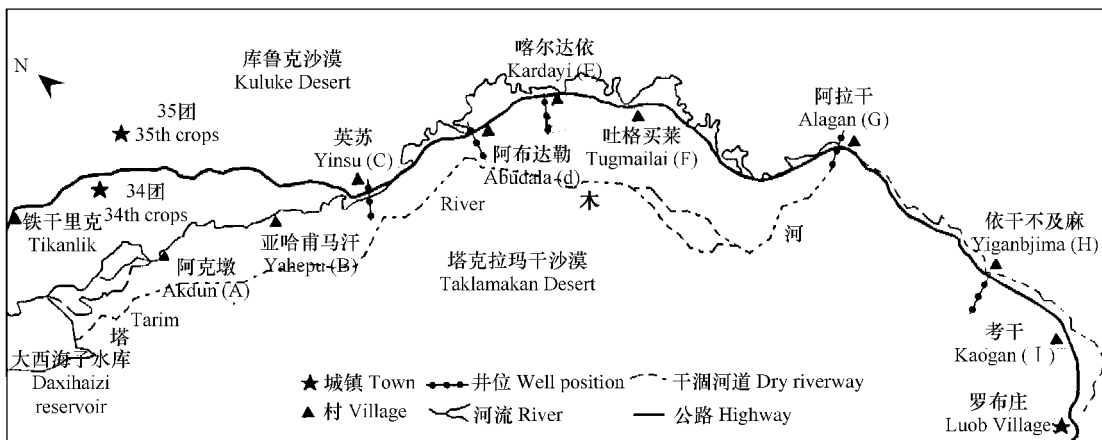


图 1 塔里木河下游各监测断面分布图

Fig. 1 The sketch of 9 groundwater -monitoring sections in the lower reaches of Tarim River

混合土样剔除植物根系及石砾等杂物,在室内风干后过筛,用于测定土壤化学性质。有机质采用重铬酸钾外加加热法,全氮用半微量-开氏法,全磷用硫酸-高氯酸-钼锑抗比色法,全钾用氢氟酸-高氯酸-火焰光度计法,有效氮采用碱解扩散法,有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法,有效钾用乙酸铵浸提-火焰光度计法,土壤含水量用烘干法,pH、电导率分别用酸度计和电导率仪测定(水土比为 5:1),具体方法见文献^[11],土壤水溶性总盐用原位盐分仪现场测定法。

1.3 数据分析方法

在塔河下游植被退化过程中土壤特性变化的研究中,主要是对不同监测地点土壤理化特性进行统计分析。首先对所有采样剖面同一土层的土壤性质指标进行算术平均,用算术平均数比较各指标在不同土层之间的差异;然后对所有剖面各土层的土壤性质指标数据进行正态分布检验,根据检验结果,采用所有剖面同一土层的数据在不同土层之间进行各指标的非参数检验或单因素方差分析,判断土壤特性出现显著差异的土层深度。以各监测断面所有采样剖面的 0 ~ 50cm 土层土壤特性指标的加权平均值为依据,采用聚类分析方法对各监测断面土壤质量进行归类。

在塔里木河下游土壤与天然植被关系分析中,运用物种多样性指数进行评判分析。物种多样性指数是物种丰富度和均匀度的综合指标,对物种多样性的衡量可以通过对群落或生境内物种丰富度、物种均匀度的测量获得^[12]。其中,丰富度作为物种多样性的一种测度方法,表达一个群落或生境中物种数目的多少;物种均匀度则指一个群落或生境中全部物种的个体数目的分配情况,它反映的是各物种个体数目分配的均匀程度。各断面的物种多样性采用断面各个样方的生物多样性平均值,多样性指数的计算方法为:

$$\begin{aligned}
 \text{Simpson 指数}(D) & D = 1 - \sum_{i=1}^s p_i^2 \\
 \text{Shannon-Wiener 多样性指数}(H') & H' = - \sum_{ij=1}^s p_i \ln p_i \\
 \text{Brillouin 指数}(H) & H = \frac{1}{N} \ln \left(\frac{N!}{n_1! n_2! n_3! \dots} \right) \\
 \text{均匀度 Evenness degree}(J') & J' = \frac{H'}{H'_{\max}} = \frac{H'}{\ln S} \\
 \text{McIntosh 多样性指数}(D_{Mc}) & D_{Mc} = \frac{N - \sqrt{\sum_{i=1}^s n_i}}{N - \sqrt{N}}
 \end{aligned}$$

式中, P_i 为第 i 种在群落中所占比例, n_i 为抽样中第 i 个物种个体数量, N 为抽样中所有物种的个体总和, H' 为 Shannon-Wiener 多样性指数, H'_{\max} 为 H' 的最大值, 等于 $\ln S$ (\ln 是以 2 为底的对数), S 为物种总数。同时将植被盖度与密度也作为多样性的测度指标进行分析。

灰色关联分析是对一个系统发展变化态势的定量描述和比较的方法。发展态势的比较, 依据空间理论的数学基础, 按照规范性、偶对称性、整体性和接近性这 4 条原则, 确定参考数列(母数列)和若干比较数列(子数列)之间的关联系数和关联度, 目的是寻求系统中各因素间的主要关系, 找出影响目标值的重要因素, 从而掌握事物的主要特征, 促进和引导系统迅速而有效地发展。关联度描述系统发展过程中因素间相对变化大小、方向及速度等指标的相对性。如果两者在系统发展过程中相对变化基本一致, 则认为两者关联度大; 反之, 两者关联度就小。本文以各断面不同样地的物种多样性指数为母序列, 以相应断面样地 0~50cm 土层的土壤有机质、全氮、全磷、全钾、有效氮、有效磷、有效钾、含水量、pH、电导率为子序列, 采用灰色关联分析方法对塔里木河下游土壤因子与物种多样性之间的关系进行研究。由于系统中各因素的量纲(或单位)不相同, 且数值的数量级相差悬殊, 因此, 对原始数据进行均值化变换, 其特点是量纲为一, 其值大于 0, 并且大部分近于 1, 数列曲线互相相交, 分辨系数 p 为 0.5。由于关联度不是唯一的, 所以关联度本身并不是关键, 而各关联度大小的排列顺序即关联序则更为重要。子序列对同一母序列的关联度按大小顺序排列, 便组成关联序, 它反映了对于母序列来说, 各子序列与母序列相关关系的远近。

数据分析中物种多样性指标计算及灰色关联分析由 DPS^[13] 完成, 其它数据处理分析由 Spss11.0 完成。

2 结果与分析

2.1 土壤特性的垂直变异

土壤中营养成分在空间和时间上呈异质性分布^[14], 而且比较复杂, 成土母质、地形、人类活动等对土壤养分的空间变异均有较大影响。经非参数检验或单因素方差分析可知塔河下游土壤除全磷外, 其余指标均在土层垂直方向上存在差异, 又可知土壤有机质等指标几乎都是从 50cm 开始变化比较明显(表 1)。因此, 对 0~50cm 和 50~170cm 两个土层土壤有机质、全氮、全磷、全钾、有效氮、有效磷、有效钾、土壤含水量等指标各自的加权平均数进行非参数检验中两个相关样本的检验, 经检验分析可知除全磷外, 其余指标含量在 0~50cm 与 50~170cm 土层之间差异显著。因水溶性总盐含量数据呈正态分布, 对不同土层土壤水溶性总盐含量进行单因素方差分析及 LSD 比较, 可知土壤水溶性总盐含量在上层(0~50cm)与下层(80~170cm)之间有差异。

2.2 不同断面土壤特性变化

由于亚哈甫马汗(B)断面虽地处塔河下游上段, 靠近大西海子水库, 但是受地形影响, 土壤荒漠化程度表现与依干不及麻(G)、考干(H)地区相似, 在聚类判断中划归为下段, 因此从塔河下游的环境梯度(自上段至下段)的角度分析土壤和植被变化时, 未考虑该监测断面。由不同断面 0~50cm 土层范围内, 有机质等含量的加权平均值(表 2)可知, 在距离河道 150m 处, 塔河下游各监测断面土壤有机质、全氮含量随着监测断面所

处的位置越接近下段含量越低,基本呈下降趋势,尤其有机质下降幅度较大;全磷、全钾含量在各断面之间变化不大,含量比较相近;有效氮、有效磷含量变化与有机质的变化相似,而有效钾含量、电导率变化复杂,趋势不明显;pH 值显示塔河下游土壤均呈碱性,而且部分地区土壤碱性较大。

表 1 塔河下游不同土层土壤特性指标

Table 1 Soil properties indices of different soil layers in the lower reaches of Tarim river

土层 Layer (cm)	有机质 OM Organic matter (g·kg ⁻¹)	全氮 TN Total nitrogen (g·kg ⁻¹)	全磷 TP Total phosphor (g·kg ⁻¹)	全钾 TK Total kalium (g·kg ⁻¹)	有效氮 AN Available nitrogen (mg·kg ⁻¹)	有效磷 AP Available phosphor (mg·kg ⁻¹)	有效钾 AK Available kalium (mg·kg ⁻¹)	总盐 TS Total salt (g·L ⁻¹)	含水量 WC Soil water content (%)
0~5	6.915	0.356	0.551	11.747	46.871	3.809	452.742	0.616	1.518
5~15	7.192	0.371	0.536	11.775	35.601	4.686	534.065	0.753	2.585
15~30	5.587	0.313	0.523	11.866	34.815	2.472	416.419	0.749	2.449
30~50	4.785	0.275	0.520	12.164	30.387	1.366	349.677	0.599	4.767
50~80	4.231	0.246	0.534	13.186	16.029	1.048	251.129	0.511	6.134
80~120	3.476	0.215	0.526	12.443	11.319	0.566	209.00	0.338	5.902
120~170	3.434	0.221	0.515	12.551	10.179	0.580	194.355	0.343	6.325

表 2 距河道 150m 处不同监测断面土壤特性指标(0~50cm)

Table 2 Soil properties indices of different monitoring sections located 150m away from Tarim river course

断面 section	有机质 OM Organic matter (g·kg ⁻¹)	全氮 TN Total nitrogen (g·kg ⁻¹)	全磷 TP Total phosphor (g·kg ⁻¹)	全钾 TK Total kalium (g·kg ⁻¹)	有效氮 AN Available nitrogen (mg·kg ⁻¹)	有效磷 AP Available phosphor (mg·kg ⁻¹)	有效钾 AK Available kalium (mg·kg ⁻¹)	含水量 WC Soil water content (%)	pH	电导率 EC Electrical conductivity (ms·cm ⁻¹)
C	5.31	0.27	0.55	11.66	24.65	3.62	289.77	4.06	8.76	4.21
D	8.95	0.42	0.54	11.08	37.24	2.83	496.30	5.52	9.01	4.85
E	5.16	0.34	0.58	11.59	44.80	2.57	328.40	1.61	8.40	3.22
F	5.25	0.28	0.54	11.54	29.50	1.82	324.50	5.09	9.12	2.52
G	4.46	0.25	0.54	10.13	19.82	0.95	454.80	4.50	9.03	4.30
H	3.98	0.21	0.52	12.11	20.26	0.40	180.20	1.44	8.53	1.04
I	2.98	0.16	0.46	11.26	9.71	1.89	533.60	1.22	8.28	4.83

2.3 不同断面土壤质量判断

塔河下游土壤除全磷外,有机质等指标含量在 0~50cm 土层与 50~170cm 之间差异显著,因此选用 8 个断面 0~50cm 土层土壤有机质、全氮等 9 个指标的加权平均数,对塔河下游不同断面土壤质量进行判断。采用分层聚类分析中的 Q 型聚类,聚类方法用最邻近法(Furthest neighbor),距离和相似性测度方法为欧氏距离(Euclidean distance),因各指标量纲不同,数据进行标准化处理,聚类结果见图 2。

由图 2 可知,根据土壤特性指标,塔河下游 8 个断面土壤质量可分为两大类,其中英苏(C)、阿布达勒(D)、喀尔达依(E)、吐格买莱(F)、阿拉干(G)为一类,亚哈甫马汗(B)、依干不及麻(H)、考干(I)为一类,在同一类的各断面土壤质量相近。分类结果表明塔河下游依据土壤质量不同大体可分为上段和下段,上段包括英苏(C)、阿布达勒(D)、喀尔达依(E)、吐格买莱(F)、阿拉干(G)地区,土壤养分含量相对较高,下段包括亚哈甫马汗(B)、依干不及麻(H)、考干(I)地区,土壤养分含量相对较低,其中亚哈甫马汗(B)虽地处塔河下游的上段,比英苏等断面离大西海子水库近,但是土壤荒漠化程度表现与依干不及麻(G)、考干(H)地区相似,因此聚类判断划归其为下段。土壤质量的划分归类结果与下游主要断面植被退化特征趋势相吻合,即在塔里木河下游的环境梯度上,植被的盖度、物种丰富度均呈递减趋势,且趋势平缓,自依干不及麻(H)开始递减幅度增大,而且植被退化趋势一致、退化程度相似的断面,它们的土壤质量经聚类又被划为同一类,据此推知塔

河下游植被变化与土壤特性变化之间有联系。

2.4 不同断面植被变化

由图 3 可知,塔河下游各断面(距河道 150m)不同的物种多样性指数呈现出相同的下降趋势,即随着监测断面的位置越靠近塔河下游下段,物种多样性指数越低,其间虽有小幅起伏,但是整体趋势仍然呈下降趋势。而在塔里木河下游的环境梯度上(自上段至下段),有研究表明随着监测断面所处的位置越接近下游,植被退化也呈一定的规律^[7],呈现为从复合群落到单一群落的演变趋势。在亚合甫马汗、英苏和阿布达勒断面的部分地段,植物群落是胡杨+柽柳群落,群落的种类组成中,乔木主要是胡杨,灌木主要有多枝柽柳、刚毛柽柳、黑刺、铃铛刺,草本植物有甘草、罗布麻、骆驼刺、芦苇,另外还有数量较少的花花柴与猪毛菜,其中胡杨与柽柳植物是该群落的优势种,在样地相对盖度的平均值分别达 50.53% 和 54.57%;在阿布达勒的部分断面以及喀尔达依、吐格买莱、依干不及麻、阿拉干断面,群落的种类组成主要为胡杨与柽柳,还伴生有黑刺、少量铃铛刺。由于地下水埋深较深,草本植物稀少,除偶见深根系的骆驼刺外几乎无其它草本植物,且植被多呈衰败状态,植被类型以荒漠化柽柳灌丛、柽柳灌丛、荒漠化胡杨林为主,在群落的水平结构上,整个群落呈现出胡杨、胡杨+柽柳和柽柳 3 种类型组成的复合性分布;在依干不及麻以下及考干河段,植物群落是单一柽柳群落,地下水位更低,植被严重退化,植被类型为荒漠化柽柳灌丛以及裸露的流动沙丘,考干以下至台特玛湖已成了湖积盐土平原,地表植被无几。

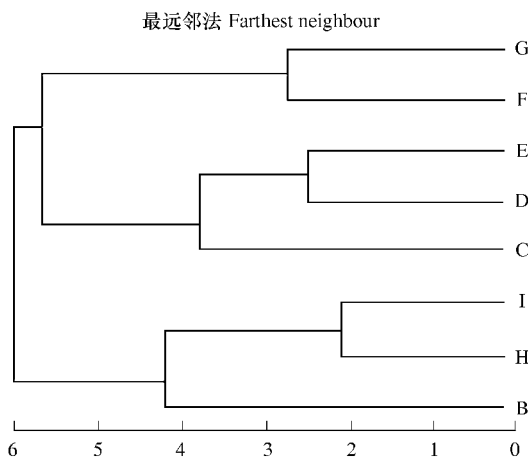


图 2 监测断面聚类树形图

Fig. 2 The cluster dendrogram chart of monitoring sections

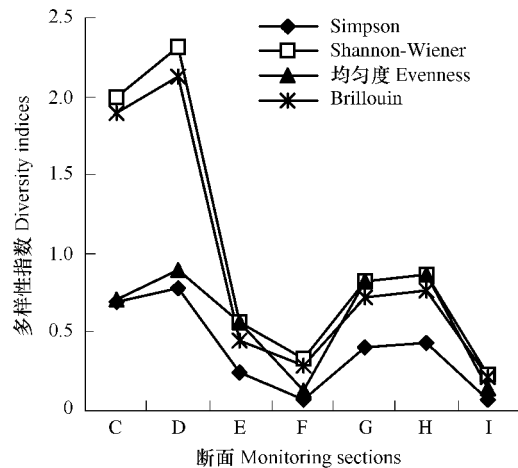


图 3 不同监测断面物种多样性指数

Fig. 3 The plant species diversity indices of different monitoring sections

2.5 土壤因子与物种多样性指数的灰色关联分析

近年来,有人应用灰色理论研究海水浮游动物密度、浮游植物密度与环境因子的关系,并取得了较好的效果^[15,16]。塔河下游土壤因子与物种多样性指数的灰色关联,分析结果见表 3。

物种多样性是反映群落结构功能特征的有效指标,是生态系统稳定性的量度。一般来说,比较稳定的群落,其多样性指标也较高。同一植物群落物种多样性升高会导致群落稳定性提高^[17,18]。由表 3 可知,不同的物种多样性指数与各土壤因子的灰关联度均较高,而且对不同的物种多样性指标,同一土壤因子与它们之间的相关性大小的排序却不同,说明土壤因子与物种多样性之间的关系比较复杂。但根据与各土壤因子的灰关联度排序位次名列前 3 名的物种多样性指数个数多少来看,有机质是 3 个指数(Shannon、Brillouin、盖度),全磷是 5 个指数(Shannon、Simpson、均匀度、Brillouin、McIntosh),全氮是 3 个指数(Shannon、Brillouin、盖度),全钾是 4 个指数(Simpson、均匀度、Brillouin、Density),充分表明有机质、全磷、全氮、全钾含量与物种多样性有着较大的相关性。

表 3 不同生物多样性指数与各土壤因子的灰关联度大小及排序

Table 3 The grey correlation grades and their order existed among plant species diversity and soil factors

多样性指数 Diversity index	有机质 OM Organic matter (g·kg ⁻¹)	全氮 TN Total nitrogen (g·kg ⁻¹)	全磷 TP Total phosphor (g·kg ⁻¹)	全钾 TK Total kalium (g·kg ⁻¹)	有效氮 AN Available nitrogen (mg·kg ⁻¹)	有效磷 AP Available phosphor (mg·kg ⁻¹)	有效钾 AK Available kalium (mg·kg ⁻¹)	含水量 WC Soil water content (%)	pH	电导率 EC Electrical conductivity (ms·cm ⁻¹)
Shannon-Wiener	0.775	0.771	0.749	0.742	0.703	0.694	0.690	0.701	0.745	0.654
排序 Order	1	2	3	5	6	8	9	7	4	10
Simpson	0.766	0.766	0.787	0.783	0.703	0.696	0.705	0.685	0.783	0.664
排序 Order	5	4	1	2	7	8	6	9	3	10
均匀度 Evenness	0.789	0.786	0.847	0.837	0.741	0.731	0.769	0.701	0.840	0.743
排序 Order	4	5	1	3	8	9	6	10	2	7
Brillouin	0.779	0.775	0.744	0.734	0.709	0.698	0.690	0.699	0.739	0.649
排序 Order	1	2	3	5	6	8	9	7	4	10
McIntosh	0.759	0.758	0.783	0.777	0.695	0.691	0.692	0.693	0.776	0.660
排序 Order	4	5	1	2	6	9	8	7	3	10
盖度 Coverage	0.754	0.744	0.740	0.730	0.706	0.690	0.765	0.672	0.740	0.720
排序 Order	2	3	5	6	8	9	1	10	4	7
密度 Density	0.791	0.790	0.790	0.796	0.792	0.774	0.803	0.768	0.793	0.789
排序 Order	5	7	6	2	4	9	1	10	3	8

3 结论与讨论

(1) 塔河下游土壤除全磷外,有机质等指标存在垂直分布差异,各指标临界变化土层深度为 50cm,且上层 0~50cm 土层土壤有机质、全氮等含量比下层的高。原因可能是过去塔河下游植被生长良好,植被对上层土壤理化性质影响较大,现在塔河下游土壤荒漠化严重,风蚀造成土壤表层粗化,细物质减少,有机质和养分含量减少。在风蚀作用的影响下,塔河下游上层土壤有机质、全氮等含量仍然比下层土壤的含量高,充分表明了塔河下游植被的存在对土壤产生了良好作用。全磷含量无垂直分布差异,可能与磷的迁移率小有关。

(2) 塔河下游依据土壤质量不同大体可分为上段和下段,其中上段土壤养分含量相对较高,同时在塔河下游的环境梯度上(自上段至下段),物种多样性指数的降低趋势与有机质等的变化相同。已有研究分析表明在新疆艾比湖地区,非生物因子土壤理化性状的空间异质性是植被空间分布差异的主要原因,其表现在土壤类型、结构、盐分、养分以及局部水分条件的改变所引起的植物建群种和优势种的变化。也就是说,土壤发生粗化、干旱化、盐渍化、贫瘠化等,导致了乔木、灌木、半灌木、多年生草类等植物群落建群种和优势种演变为耐干旱、耐盐碱的小半灌木、盐柴类和 1 年生植物,植物种类减少、盖度降低^[19]。塔里木河下游土壤空间异质性特征显著,植物群落空间分布差异表现明显,物种多样性变化趋势与土壤养分含量的空间(自上段至下段)变异趋势一致,二者变化趋势的一致性表明了土壤特性的变化在一定程度上可以反映物种多样性的变化。

(3) 在塔里木河下游的环境梯度上(自上段至下段),植被退化呈现出从复合群落到单一群落的演变趋势,即从乔(胡杨为主)、灌(柽柳为主)、草复合群落演变到单一的柽柳灌丛群落。植物群落的演变与一定的环境因子有关,如美国 Whitford 等发现当多年生草地生态系统演替为以灌丛为主的生态系统时,原有的水分胁迫的生态系统变为水—氮胁迫的生态系统,氮和水的有效性取决于风蚀、径流、动物活动和土壤有机质的迁移、再分布^[20]。Schlesinger 等通过系统调查分析表明,在荒漠生境中,土壤 N、P、K 的空间变异性分布与灌丛植被的出现高度相关,灌丛植被通过对这些元素的生物富集,在灌丛覆盖区形成一个个“肥岛(Islands of fertility)”;而在灌丛间区,生物活性明显较低,碱金属、碱土金属元素质量分数则相对较高。在半干旱地区地表物质损失促进了灌丛的发育,并导致土壤氮等营养元素的空间变异增大;土壤氮素等养分的变异又进一步促进灌丛的入侵和发展^[21]。由此可知,在塔里木河下游植物退化过程中,虽然植被的变化主要是受水分的影响^[22],但是柽柳灌丛植物能够占据优势的土壤机理应该与土壤氮等营养元素的空间变异有一定关系。

(4) 灰色关联分析表明塔河下游土壤因子与物种多样性之间有相关性,其中物种多样性与上层土壤(0~50cm)有机质、全氮、全磷、全钾含量的相关性较高,因此在塔里木河下游的环境梯度上(自上段至下段),土壤因子中有机质、全氮、全磷、全钾的变化能在一定程度上反映物种多样性的变化。

有机质与物种多样性相关性大,原因可能是因为土壤有机质主要来自植物凋落物、根系,因此植物物种组成越丰富,相应凋落物种类越丰富,有机质含量相应也就越高,因此有机质含量高低可以反映物种多样性大小;全氮含量的高低与土壤有机质含量高低有显著的相关性,全磷、全钾含量高低虽主要受土壤母质的影响,但同时土壤有机质也是磷、钾的重要来源,而且已有研究表明植物在生长过程中对土壤养分含量有明显的提高作用,且不同植被下土壤养分具有明显的表聚效应^[23],因此在塔河下游的环境梯度上,有机质、全氮、磷、钾,尤其是有机质的变化能在一定程度上反映物种多样性的变化。此结果与有关研究结果相似,如 Gartlan 等研究显示,土壤中 P、Mg、K 的水平与热带植物群落物种多样性之间存在着显著的相关关系^[24]; Ferris 等研究表明,英国松树林群落组成变化主要与土壤肥力梯度有关,即受酸碱度、可交换钙、硝态氮的增加及土壤有机质、氨态氮的降低的影响,相反,维管类和苔藓类植物的多样性与有效氮有关^[25]; Van Breemen 等认为土壤是生态系统工程的产物,因为土壤所在生态环境、较大的动物以及植物均对土壤理化性质有影响^[26]。植物能够影响土壤许多性质,如酸度和有效养分,而这些性质对植物的生存和生长有重要意义^[27]。安树青等研究表明较大的影响紫金山次生森林群落物种多样性的土壤因子是土壤厚度、含水量和酸碱度,土壤酸性增加(pH6.3~5.0),多样性上升^[28]。

而其余土壤因子与各物种多样性指数的灰关联度的排序表明他们与物种多样性之间的相关性相对较远,但有研究^[22]表明地下水位的不断下降和土壤含水率大大丧失是引起塔里木河下游植被退化的主导因子,且塔河下游土壤含水量受地下水水位影响明显,表明了土壤含水量变化与物种多样性变化有关,但是本研究中土壤含水量与物种多样性指数之间的灰关联度大小显示土壤含水量与物种多样性之间的关系相对较远,原因一方面可能是因为塔河下游草本少,物种多样性变化主要受乔(胡杨)、灌(柽柳)数量变化的影响,而胡杨和柽柳灌丛根系分布深度超过 50cm,0~50cm 土层土壤含水量对它们影响不大;另一方面可能是由于土壤水分数据有限,影响了灰色关联分析的结果。因此,关于土壤含水量与物种多样性变化的关系仍需进一步深入研究,而且用土壤含水量作为反映物种多样性变化的指标时需明确相应的土层深度。另外,有研究表明盐分梯度不仅引起多样性的变化,而且是植物群落分布和演替的重要影响因素^[29],而本研究结果显示在塔里木河下游地区,土壤酸碱度、土壤中水溶盐含量(电导率)与物种多样性之间相关性较小,原因可能是因为目前塔河下游生长的植物主要都是耐盐碱的物种,而且它们根系在土壤中分布较深,而土壤盐分含量在上层(0~50cm)积累多,下层相对较少,盐碱不是这些植物生长的主要胁迫因子,因此它们的变化对该区植被物种多样性变化的反映程度较小。因此,充分把握土壤—植被间的相应关系,对于有效恢复和重建塔里木河下游地区的生态环境具有重要的意义。

References:

- [1] Robertson G P, Vitousek P M. Nitrification potentials in primary and secondary succession. *Ecology*, 1981, 62: 376—386.
- [2] Vitousek P M, Matson P A, Cleve K V. Nitrogen availability and nitrification during succession, primary, secondary and old field series. *Plant and Soil*, 1989, 115: 229—239.
- [3] Tilman D. Nitrogen-limited growth in plants from different successional stages. *Ecology*, 1986, 67: 555—563.
- [4] Li X, Zhou H F. Sustainable utilization of water resources of Tarim River under the influence of human activities. *Geographical Research*, 1998, 17(2): 171—177.
- [5] Chen Y N, Cui W C, Li W H, *et al.* Utilization of water resources and ecological protection in the Tarim River. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(2): 215—222.
- [6] Chen Y N, Zhang H F, Li W H, *et al.* Study on species diversity and the change of groundwater level in the lower reaches of Tarim River, Xinjiang, China. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(2): 158—165.
- [7] Liu J Z, Chen Y N, Li W H, *et al.* Analysis on the distribution and degraded succession of plant communities at lower reaches of Tarim River.

- Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(2) : 379—383.
- [8] Xu H L, Song Y D, Chen Y N, *et al.* Study on the degeneration of ecological environment in the lower reaches of the Tarim River by using factor analysis. *Arid Land Geography*, 2005, 28(1) : 21—25.
- [9] Zhang Y M, Chen Y N, Zhang X L. Plant communities and their interrelations with environmental factors in the lower reaches of Tarim River. *Acta Geographic Sinica*, 2004, 59(6) : 903—910.
- [10] Li X Y, Zhang P T, Zhang Y S. Analysis on the features and the decline causes of the green corridor at the lower reaches of the mainstream of Tarim River. *Arid Zone Research*, 2001, 18(4) : 28—30.
- [11] Laboratory of Soil Physics, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. *Methods of Soil Physic Measurement*. Beijing: Science Press, 1978.
- [12] Ma K P, Huang J H, Yu S L, *et al.* Plant community diversity in Dongling Mountain, Beijing, China II. Species richness, evenness and species diversities. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, 15(3) : 268—277.
- [13] Tang Q Y, Feng M G. *DPS Data processing system for practical statistics*. Beijing: Science Press, 2002.
- [14] Campbell B D, Grime J P. A. Comparative study of plant responsiveness to the duration of episodes of mineral nutrient enrichment. *New Phytology*, 1989, 112: 261—267.
- [15] Huang W J, Huang G H, Jiang T J, *et al.* Analysis of grey incidence of chlorophyll (a,b,c) and ecology factor in Dapeng Bay, South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 2000, 22(1) : 136—140.
- [16] Huang W J, Qi Y Z, Ruan Z F. Analysis of grey incidence of ecology factors in Dapeng Bay, South China Sea. *Ecologic Science*, 1997, 16(1) : 34—39.
- [17] Peng S L. *The dynamic of forest community in South sub-tropical area*. Beijing: Science Press, 1996.
- [18] Li Y H. Grazing dynamics of the species diversity in *Aneurolepidium* Chinese Steppe and *Stipa Grandis* Steppe. *Acta Botanica Sinica*, 1993, 35(11) : 877—884.
- [19] Qian Y B, Jiang J, Wu Z N. Soil Heterogeneity and its impact on ecological distribution of plant Community in the Aiby Lake Area. *Arid Land Geography*, 2003, 26(3) : 217—221.
- [20] Whitford W G, Reynolds J F, Cunningham G L. How desertification affects nitrogen limitation of primary production on Chihuahuan Desert watersheds. In: Moir W & Aldon E A. eds. *Proceedings of the symposium on strategies for classification and management of natural vegetation for food production in Arid Zones*. Denver, Colorado: U. S. Forest Service, 1987.
- [21] Shlesinger W H, Pilmanis A M. Plant-soil interactions in deserts. *Biogeochemistry*, 1998, 42(1-2) : 169—187.
- [22] Chen Y N, Li W H, XU H L, *et al.* The influence of groundwater on vegetation in the lower reaches of Tarim River, China. *Acta Geographic Sinica*, 2003, 58(4) : 542—549.
- [23] Gong J, Chen L D, Fu B J, *et al.* Effects of vegetation restoration on soil nutrient in a small Catchment in Hilly Loess area. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1) : 93—96.
- [24] Gartlan J S, Newbery D M, Thomas K W, *et al.* The influence of topography and soil phosphorous of the vegetation of Korup Forest Reserve. *Cameroun Vegetation*, 1986, 65:131—148.
- [25] Ferris R, Peace A J, Humphrey J W, *et al.* Relationships between vegetation, site type and stand structure in coniferous plantations in Britain. *Forest Ecology and Management*, 2000, 136: 35—51.
- [26] Van Breemen N. Soils asbiotic constructs favouring net primary productivity. *Geoderma*, 1993, 57: 183—211
- [27] Van Breemen N, Finzi A C. Plant-soil interaction: ecological aspects and evolutionary implications. *Biogeochemistry*, 1998, 42(/12) : 1—19.
- [28] An S Q, Wang Z F, Zhu X H, *et al.* Effects of soil factors on species diversity in secondary forest communities. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 1997, 15(2) : 143—150.
- [29] Gu F X, Zhang Y D, Pan X L, *et al.* Correlation between soil saltilisation and community diversity: the case of Fukang OASIS. *Resource Science*, 2002, 24(3) : 42—48.

参考文献:

- [4] 李新,周宏飞. 人类活动干预后的塔里木河水资源持续利用问题. *地理研究*, 1998, 17(2) : 171~177.
- [5] 陈亚宁,崔旺诚,李卫红,等. 塔里木河的水资源利用与生态保护. *地理学报*, 2003, 58(2) : 215~177.
- [6] 陈亚宁,张宏锋,李卫红,等. 新疆塔里木河下游物种多样性变化与地下水位的关系. *地球科学进展*, 2005, 20(2) : 158~165.
- [7] 刘加珍,陈亚宁,李卫红,等. 塔里木河下游植物群落分布与衰退演替趋势分析. *生态学报*, 2004, 24(2) : 379~383.
- [8] 徐海量,宋郁东,陈亚宁,等. 应用因子分析研究塔里木河下游生态环境的退化. *干旱区地理*, 2005, 28(1) : 21~25.
- [9] 张元明,陈亚宁,张小雷. 塔里木河下游植物群落分布格局及其环境解释. *地理学报*, 2004, 59(6) : 903~910.

- [10] 李香云,张蓬涛,章予舒. 塔里木河下游绿色走廊特点及衰败成因分析. 干旱区研究, 2001, 18(4): 28~30.
- [11] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室编. 土壤物理性质测定法. 北京:科学出版社, 1978.
- [12] 马克平,黄建辉,于顺利,等. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究 II. 丰富度、均匀度和物种多样性指数. 生态学报, 1995, 15(3): 268~277.
- [13] 唐启义,冯明光. 实用统计分析及其 DPS 数据处理系统. 北京:科学出版社, 2002.
- [15] 黄伟建,黄贯虹,江天久. 大鹏湾叶绿素与生态因子灰关联分析. 海洋学报, 2000, 22(1): 136~140.
- [16] 黄伟建 齐雨藻,阮志峰. 大鹏湾生态因子灰关联分析. 生态科学, 1997, 16(1): 34~39.
- [17] 彭少麟. 南亚热带森林群落动态学. 北京:科学出版社, 1996.
- [18] 李永宏. 放牧影响下羊草草原和大针茅草原植物多样性的变化. 植物学报, 1993, 35(11): 877~884.
- [19] 钱亦兵,蒋进,吴兆宁. 艾比湖地区土壤异质性及其对植物群落生态分布的影响. 干旱区地理, 2003, 26(3): 217~221.
- [22] 陈亚宁,李卫红,徐海量,等. 塔里木河下游地下水位对植被的影响. 地理学报, 2003, 58(4): 542~549.
- [23] 巩杰,陈利顶,傅伯杰,等. 黄土丘陵区小流域植被恢复的土壤养分效应研究. 水土保持学报, 2005, 19(1): 93~96.
- [28] 安树青,王峥峰,朱学雷,等. 土壤因子对次生森林群落物种多样性的影响. 武汉植物学研究, 1997, 15(2): 143~150.
- [29] 顾峰雪,张远东,潘晓玲,等. 阜康绿洲土壤盐渍化与植物群落多样性的相关性分析. 资源科学, 2002, 24(3): 42~48.