

退耕地人工植物群落根系生态位及其分布特征

胡建忠¹, 郑佳丽, 沈晶玉

(北京林业大学水土保持学院 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要:根系生态位研究是全面掌握植物群落特性、种间搭配以及生态功能的重要科学问题,其测度方式、分布特征、影响因素等方面内容,对于合理指导退耕还林还草工程十分必要。将植物群落根系视为“标准地”,分布于每个土体层次的每个径级根系视为“植物种”,根量、根长、根数作为“植物种”的观测变量,仿照群落生态学方法,提出了一种综合计算根系生态位指数的方法。即将整个研究区域作为一个系统,将这一系统中所有植物群落,统一选用指标最大值,在纵向(即相对于指标维的不同指标)用上限效果测度公式统一进行归一化处理,然后在横向(土层、径级间,简称层径级)进行合并运算,得出层径级根系参数,这一参数定义为层径级根系生态位指数;而将某一群落各层径级生态位指数之和,定义为植物群落根系生态位指数,从而使区域内所有植物群落间具有可比性。使用这一方法,对国家退耕还林还草科技试验县——青海省大通县退耕地人工植物群落根系进行了系统研究。研究结果表明,根系生态位垂直空间分布大多数为典型的表层聚积型,表土层 0~20cm 根系生态位指数明显高于其它层次。植物群落根系比单一种群或纯林根系具有更高的生态位指数。根系生态位径级分布包括 J 型、反 J 型、S 型和 U 型。J 型多为粗根-深根型植物群落根系,反 J 型为细根-浅根型植物群落根系,S 型和 U 型为上述 2 种类型之间的过渡型。根系生态位指数与植物群落地上部分鲜重生物量、根系丰富度呈显著正相关。退耕地植物群落根系的生态位指数较为接近天然植被,明显高于农作物根系。青海云杉+中国沙棘、中国沙棘、青海云杉等 3 种植物配置模式更有利于退耕地植物根系生态位的恢复。实施退耕还林还草工程是有效增加根系生态位、提高根系多方面功能的重要途径。

关键词:生态位指数;根系层次;根系径级;植物群落;退耕地

Discussion of root ecological niche and root distribution characteristics of artificial phyto-communities in rehabilitated fields

HU Jian-Zhong, ZHENG Jia-Li, SHEN Jing-Yu (College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University; Key Lab. of Soil and Water Conservation and Desertification Combating of the Ministry of Education, Beijing 100083, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 481~490.

Abstract: In the implementation phase of the Conversion of Cropland to Forest and Grassland (CCFG) project in China, it is important, from a scientific point of view, to recognize the characteristics of phyto-communities, species compatibility and their ecological function. We must also acknowledge the ecological niche that roots occupy, their abundance and distribution as well as the factors which affect them.

Following the methodology of community ecology, we measure the total root mass of the phyto-community as a cubic volume. Root biomass, length and number of roots in every diameter class, for each soil layer and for each different plant species are regarded as observation variables.

In first instance therefore, we propose a new method to calculate the ecological niche index of roots (RENI), embracing the entire phyto-community of plantations. In the methodology all of the study area will be treated as one system, which requires that all data be standardized to the maximum of three root indexes respectively and summed by root diameter groups in each soil layer in order to obtain the RENI of each root layer.

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2002CB111503);国家“十五”科技攻关计划资助项目

收稿日期:2003-12-17; **修订日期:**2004-09-24

作者简介:胡建忠(1962~),男,甘肃天水人,博士,高级工程师,主要从事生态工程研究。E-mail:bfuswc@163.com

Foundation item: National 973 project (No. 2002CB111503) and National Tenth-five-year project (No. 2001BA510B01)

Received date: 2003-12-17; **Accepted date:** 2004-09-24

Biography: HU Jian-Zhong, Ph. D., Senior engineer, mainly engaged in ecological engineering. E-mail:bfuswc@163.com

We define the sum of all the RENIs of each soil layer as the RENI of the phyto-community in order to be able to compare different plant communities in the area easily and in a scientific manner.

In the new method we propose in our paper, we deal with the roots of the phyto-communities in Datong county, Qinghai province, one of the counties selected for the national CCFG experiment.

The results show that most of the vertical distribution of plant roots belong to the type where the roots are concentrated in the top soil layer (0~20 cm), far more than in the lower soil layers.

The RENI of phyto-communities is higher than that of pure stands or a monoculture. The distribution of RENI by root diameter can be divided into four types: the J type, the inverse J type, the S type and the U type.

For plants of the J type, most roots are thick, deeply imbedded in the soil and act as soil stabilizers.

Plants of the inverse J type have more fibrous roots and are found in the top soil layers. They have anti scouring and anti-erosion functions.

Community roots of the S and U type are transitional and exhibit characteristics of both the J and the inverse J type with moderate values.

The RENI is positively correlated with wet biomass of the above ground level stem, branch and plant leaves and with the species richness of the phyto-community.

Although the RENIs of plantations on rehabilitated fields are a little lower than those of natural forests, they are obviously higher than those of cultivated crops.

The RENIs of the following three community types in the rehabilitated fields: *Picea crassifolia* + *Hippophae rhamnoides* ssp. *sinensis*, *Hippophae rhamnoides* ssp. *sinensis* and *Picea crassifolia* benefit greatly from the restoration project.

The implementation of the CCFG is important for the increase in the RENI and the multiple functions of plant roots.

Key words: RENI; distribution; root layer; phyto-community; rehabilitation field

文章编号:1000-0933(2005)03-0481-10 中图分类号:S718.5 文献标识码:A

一个植物群落中的物种生态位(niche),不仅反映了物种与其所处群落中其它物种间的关系,而且也反映了它与所处环境的互动情况。以往生态位理论的研究,主要集中在植物地上部分对光、热、水资源的竞争和利用方面。实际上,生物(包括土壤生物)之间,也在为争夺地下土壤水、热、气、肥和土壤空间而存在着激烈的竞争排斥斗争,且比地上部分的争夺更为激烈。植物群落以土壤为载体。群落内不同生活型的植物根系,甚至同种群植物根系之间,为了争夺土壤生存空间而有策略地在土壤中呈镶嵌分层分布特征。为了获取水分,有些植物的根系可伸展到地下数米甚至数10 m深处;不同植物对不同土壤化学元素也有不同的需求。因此,植物根系研究^[1~5]一直以来是生态学研究的重要内容,但由于根系研究的困难比较多,严重影响了有关研究的进展。虽然一些植物群落随土壤环境因子梯度变化的生态位已有报道^[6,7],对于揭示土壤与植物群落的关系,具有重要的价值;土壤生态位的概念业已提出^[8],以反映生物在土壤中所具有的生态幅度。但作为在土壤中起着机械支撑、吸收、输导作用的植物根系,其生态位的研究还极为少见,而这些内容是完整掌握植物群落特性、种间搭配以及生态功能的重要科学命题。

本文试图在根系生态位的测度方式、分布特征、影响因素等方面做一些有益探讨,进一步丰富、完善生态位研究的有关内容;并以国家退耕还林还草科技试验县——青海省大通县退耕地人工植物群落根系作为验证,为科学指导退耕还林还草工程提供重要理论依据。

1 实验方法

1.1 研究对象

研究地区青海省大通县,位于黄河二级支流——北川河流域,地处祁连山地与黄土高原的过渡地带,介于东经100°51'~101°56'、北纬36°43'~37°23'之间,海拔2280~4622m,地处中纬度地区,深居内陆,海拔高,属大陆性气候。年日照时数为2605h,年平均气温2.8℃,极端最高气温为30.9℃(1972年8月10日),极端最低气温为-33.1℃(1975年12月14日),无霜期70~120d,年平均降水量508mm,年平均蒸发量1290mm,年湿润指数变化范围为0.56~1.32。主要土类有高山石质土、高山草甸土、山地棕褐土、黑钙土、栗钙土、潮砂土、垫淤土、沼泽土等。森林植被属寒温性常绿针叶林类型及落叶阔叶林类型,其分布状况不但有明显的坡向性,而且还有明显的垂直地带性。

研究对象主要为大通县境内不同时间序列的退耕地人工林,同时选取当地天然次生林、农作物、弃耕地杂草等进行对比研究。各对比的气象、地形、土壤等生态环境因子基本相似,立地条件类型多为低位脑山阴缓斜坡立地类型,其主要植物群落类型详见表1。

表 1 调查地区主要植物群落基本情况

Table 1 Information of main phyto-communities in the surveying area

标准地编号 Quadrangle No.	地类 Land use type	优势植物* Dominant plant	树高 (m)	胸径 (cm)	总盖度(%) Total coverage
Q71901	2001 年退耕还药地 Rehabilitated herbage land in 2001	川赤芍 <i>Paeonia veitchii</i>			90
Q71902	1988 年退耕还林地 Rehabilitated forestland in 1988	华北落叶松 <i>Larix principis-rupprechtii</i>	6.7	6.5	95
Q72001	2001 年退耕还草地 Rehabilitated grassland in 2001	紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>			95
Q72201	1995 年退耕还林地 Rehabilitated forestland in 1995	青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>	1.5	4.1	98
Q72301	天然次生林地 Native secondary forestland (50 a)	白桦 <i>Betula platyphylla</i>	6.9	9.2	92
Q72302	1987 年退耕还林地 Rehabilitated forestland in 1987	华北落叶松 <i>Larix principis-rupprechtii</i>	6.7	7.0	92
Q72401	1995 年弃耕地 Abandoned fields in 1995	垂穗披碱草 <i>Elymus nutans</i>			98
Q72402	农耕地 Cropland(1 a)	豌豆 <i>Pisum sativum</i>			98
Q72901	天然灌丛地 Native bush land(30 a)	匍匐栒子 <i>Contoneaster adpressus</i>			85
Q80201	天然次生林地 Native secondary forestland(50 a)	青海云杉 + 白桦 <i>Picea crassifolia</i> + <i>Betula platyphylla</i>	20.0	27.3	90
Q80301	天然次生林地 Native secondary forestland (55 a)	青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>	16.3	24.4	90
Q80302	天然次生林地 Native secondary forestland (40 a)	山杨 <i>Populus davidiana</i>	5.8	9.6	95
Q80901	1982 年退耕还林地 Rehabilitated forestland in 1982	青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>	6.8	9.1	92
Q80902	1982 年退耕还林地 Rehabilitated forestland in 1982	华北落叶松 <i>Larix principis-rupprechii</i>	6.8	7.2	85
Q80903	1994 年退耕还林地 Rehabilitated forestland in 1994	中国沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i> ssp. <i>sinensis</i>			90
Q81001	农耕地 Cropland(1 a)	小麦 <i>Triticum aestivum</i>			98
Q81002	农耕地 Cropland(1 a)	油菜 <i>Brassica campestris</i>			98
Q81101	1982 年退耕还林地 Rehabilitated forestland in 1982	白桦 + 中国沙棘 <i>Betula platyphylla</i> + <i>Hippophae rhamnoides</i> ssp. <i>sinensis</i>	8.5	8.7	90
Q81103	1993 年退耕还林地 Rehabilitated forestland in 1993	青海云杉 + 中国沙棘 <i>Picea crassifolia</i> + <i>Hippophae rhamnoides</i> ssp. <i>sinensis</i>	4.0	4.6	92
Q81201	1982 年退耕还林地 Rehabilitated forestland in 1982	青杨 + 中国沙棘 <i>Populus cathayana</i> + <i>Hippophae rhamnoides</i> ssp. <i>sinensis</i>	8.2	11.2	85

* 下同 the same below

1.2 根系取样分析方法

对每一植物群落,根据地形等限制因子情况,设置 10m×20m 或 20m×20m 标准地,详细测定与记载各有关立地、林分、群落和土壤等因子。在受干扰小、面积较大的植物群落类型中心地段,选择设置土壤剖面,同步进行根系取样调查。根系调查选用“土块法”^[9],土块水平面积一般为 50cm×100cm 或 100cm×100cm,土块深度挖至根系底层。重复 3 次。

(1)从土表向下按 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100cm 等的层次,一直取到没有植物根系为止。分层拣出全部植物,装袋后带回室内进行后续分析。

(2)分层根系带回室内后,用水经 0.5mm 网筛冲洗干净,晾干后分级。分级的标准^[10,11]为<1、1~3、3~5、5~10、>10mm 等 5 级。

(3)对于每一级根系,分别计数根数,量取根长(cm),称取根鲜重(g)。

(4)按根系级别称取一定比例的根系,在 80℃的烘箱中烘至恒重,称得根系干重。再按根系剖面水平面积换算为单位面积的根量参数。

1.3 根系参数计算方法

作为植物群落的重要组成部分,根系不仅发挥着其基本的机械支撑功能,而且也是十分重要的吸收和输导器官,植物各种生理代谢所需的水分、矿质元素都是主要通过根系从土壤中吸收、传送至植物地上部分。根系的测量指标,主要包括根量、根长和根数,它们分别代表着质量、长度和数量的不同概念。根量指标往往以损失细根为代价,而根长、根数指标恰恰相反,粗根基本上得不到如实反映。三者之间紧密联系,相互补充。为了能够用一个指标综合反映这 3 个根参数的特征,同时还格外具有更深层次的涵义,本文提出了根系生态位指数的概念;并针对一些有关研究通过根量代表根系生态位的简单方法^[12,13],提出了一套新的、综合的根系生态位指数计算方法。

1.3.1 根系生态位指数的计算方法

设:根系为处于 3 维空间 R^3 中的一个区域 $D \in R^3$,其垂直维为土体层次 $D_i(i=1,2,\cdots)$,即 0~20cm,20~40cm, $\cdots$;水平维

为不同径级根系 $R_j(j=1,2,3,4,5)$, 即 $<1\text{mm}$, $1\sim 3\text{mm}$, $3\sim 5\text{mm}$, $5\sim 10\text{mm}$, $>10\text{mm}$; 指标维为 $I_k(k=1,2,3)$, 即根量(W)、根长(L)、根数(N)。则有:

$$Z = f(D_i, R_j, I_k) \quad Z \in R^3$$

式中, Z 为等同于植物群落标准地概念的不同层次、不同径级的植物群落根系参数的集合。

仿照群落生态学研究方法, 将植物群落根系视为“标准地”, 分布于每个土体层次的每个径级根系视为“植物种”, 根量、根长、根数作为“植物种”的观测变量。则:

$$E_{ij} = \frac{1}{3} \sum_i \sum_j (W_{ij}/W_{\max} + L_{ij}/L_{\max} + N_{ij}/N_{\max})$$

式中, E_{ij} 为层径级根系生态位指数; $W_{\max}$ 、 $L_{\max}$ 、 $N_{\max}$ 分别为对应于根量 W_{ij} 、根长 L_{ij} 、根数 N_{ij} 的指标最大值。

而将某一群落各层径级生态位指数(E_{ij})之和, 定义为植物群落根系生态位指数 E :

$$E = \sum_{i,j} E_{ij}$$

式中, E 值还可以进一步做归一化处理为 E' , 即用系统中最大的植物群落根系生态位指数作为分母, 将所有根系生态位归并为 $0\sim 1$ 的指数, 这样更能直截了当对比植物群落根系的特征。

1.3.2 仿照群落生态学的其它根系辅助指标 按照常规群落生态学^[14,15]方法, 即在计算出(层径级)重要值的基础上, 求算各物种(此处为植物群落根系)多样性指数:

$$IV = W' + L' + N'$$

式中, IV 为重要值(important value); W' 为相对根量; L' 为相对根长; N' 为相对根数, 这 3 个指标均反映了植物群落根系在某层各径级中的根量、根长、根数分别占它们在整个土壤剖面中全部层径级中根量、根长、根数的比例:

$$D = \sum_{i=1}^S P_i^2$$

式中, D 为 Simpson 优势度(Simpson's Dominance); S 为群落内的物种数(此处为层径级数); P_i 为某一种个体数占总体数的百分比(此处分别为各层径级重要值 IV_{ij} 与总重要值 IV 之比):

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

式中, H 为 Shannon-Wiener 多样性指数(Shannon-Wiener Diversity), 其余指标含义同前:

$$J = H/H_{\max}$$

式中, J 为 Pielou 均匀度指数(Evenness), $H_{\max} = \ln S$, H 、 $H_{\max}$ 、 S 含义同前。

丰富度(Richness)指每一群落的物种数, 此处为层径级数。

这些指标作为根系生态位指数的补充, 一起构成综合衡量植物群落根系生态位的指标体系。

层径级生态位指数是对根系综合特征的一种十分重要的描述方式, 主要通过作为客体的生态环境空间垂直分布, 和作为主体的生物根系径级分布 2 个方面的特征来综合反映。

2 结果分析

2.1 根系生态位的垂直空间分布格局

通过分析根系生态位指数的垂直空间分布格局, 可以定量掌握根系的分布层次及其垂直变化规律, 特别有助于掌握根系密集层以及强化土体强度的有效层次。研究地区一些主要植物群落根系生态位指数与土层深度的回归模型见表 2。

表中各模型的回归方程为:

Power 模型	$Y = b_0 X^{b_1}$
Inverse 模型	$Y = b_0 + b_1/X$
S 模型	$Y = e^{(b_0 + b_1/X)}$
Logarithmic 模型	$Y = b_0 + b_1 \ln X$

从表 2 中可以看出, 所有模型均符合回归判定系数(X^2)和 F 检验。Inverse 模型、S 模型、Power 模型以及 Logarithmic 模型均为表层生态位指数较高, 向下依次递减的模型(图 1), 表土层 $0\sim 20\text{cm}$ 均为根系密集层, 或根系活跃层次。这一生态位分布方式对于生态工程建设来说十分有效, 因为根系密集分布层次与土壤侵蚀层次完全吻合。在垂直剖面中, 表层具有最高的根系生态位指数, 通过密集根系增加了土粒内聚力和机械加固作用, 必然会有效促进表土层的抗侵蚀性能。

根系生态位指数在表土层 $0\sim 20\text{cm}$ 明显高于其它层次, 为典型的表层聚积生态位型, 大通县大多数植物群落根系属于这一类型; 同时也发现, 其中也有层次间过渡较为和缓的类型, 如 Q80302(山杨天然次生林)、Q81101(退耕地白桦+中国沙棘人

工林)、Q81102(退耕地青杨+白桦+中国沙棘人工林)、Q81103(退耕地青海云杉+中国沙棘人工林)等,这些均为深根与浅根型根系的搭配类型,根系生态位在层间过渡缓慢,对土体养分的利用更加充分,粗壮深根还具有加固深层土体、防止一定程度重力侵蚀的作用。

表 2 主要植物群落类型根系生态位指数与土层之间的回归模型及参数

Table 2 Regression models and parameters between RENI and soil layers of main phyto-communities							
标准地编号 Quadrangle No.	回归模型 Regression model	判定系数 R^2	自由度 DF	F 值 F value	F 检验 Significant F	系数 b_0	系数 b_1
Q71902	Power	0.993	2	265.26	0.004	1170.61	-2.5472
Q72001	Inverse	0.973	2	71.85	0.014	-0.0176	3.1001
Q72201	Inverse	0.912	3	31.05	0.011	-0.4024	29.5355
Q72401	S	0.994	1	157.97	0.051	-8.0525	112.216
Q72402	S	0.997	1	298.16	0.037	-6.5252	40.6842
Q80201	Inverse	0.987	2	148.84	0.007	-0.7692	54.9602
Q80301	S	0.997	1	376.15	0.033	2.9533	-0.1271
Q80302	Logarithmic	0.928	2	25.74	0.037	0.8959	-0.1946
Q80901	Inverse	0.983	2	117.3	0.008	-0.2392	22.0729
Q80902	S	1.000	1	12996.1	0.006	-2.8241	43.1888
Q80903	Power	0.999	1	831.14	0.022	213264	-4.0032
Q81101	Inverse	0.993	2	305.55	0.003	-0.19	19.3714
Q81102	Logarithmic	1.000	1	49140.1	0.003	1.0415	-0.2482
Q81103	Inverse	0.999	2	1579.91	0.001	-0.1109	11.9858
Q81201	Logarithmic	0.994	2	351.3	0.003	1.4876	-0.3265

根系分布的层次受制于土体与植物群落的生物学特性 2 个方面。一般土层越厚、土壤越干旱、疏松,根系分布越深;反之亦然。而植物的内在属性,即深根性、浅根性是决定植物群落根系分布的另一重要因素,它是植物世代适应环境条件的遗传结果。但也应该看到,深根性、浅根性并不是一成不变的,它会随着土壤生态环境而发生一定阈值范围内的变化。作为一个植物群落,它往往聚集了乔、灌、草的不同组合,或者各种根型的不同组合,通过群落优势,取长补短,最大限度地充分占据、有效利用了土壤层次,从而使现实生态位(realized niche)愈加接近基础生态位(fundamental niche)^[16]。植物群落根系具有比单一种群或纯林根系更高的生态位。青海云杉天然纯林 E' (归一化后的生态位指数)为 0.657,而位于同一立地条件下的青海云杉+白桦天然混交林 E' 为 1.000,前者仅为后者的 65.7%。

2.2 根系生态位的径级数量分布格局

本文所定义的根系层径级生态位指数,不仅反映了不同层次根系在土体中的垂直分布特征,而且还反映了不同径级根系的数量分布特征。通过对其生态位指数的径级分布格局的分析,可以掌握在各种植物群落根系中,生态位主要集中分布在哪些径级的根系中,哪些径级根系是根系生态位的主体。大通县一些主要植物群落根系生态位与径级间的回归模型计算结果见表 3。

除前述根系生态位垂直分布的一些模型外,表 3 中其它模型的回归方程为:

Quadratic 模型

$$Y = b_0 + b_1X + b_2X^2$$

Cubic 模型

$$Y = b_0 + b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$$

从表 3 中可以看出,各回归模型的判定系数、 F 值均符合回归显著性要求。这些模型各具特色,反应了不同的分布类型。通过根系层径级指数与径级的相关散点图(图 2)可以发现,生态位指数随根系径级的变化基本上可以分为 4 种类型:

(1)J 型 即生态位指数随根系径级的增加而增加(径级为横轴,生态位指数为纵轴),大于 10mm 径级根系的生态位指数最高,因此也可以称为粗根型。属于这种类型的植物群落类型主要有:Q72001(退耕地紫花苜蓿群落)、Q80301(青海云杉天然次生林)、Q72901(匍匐栒子天然灌丛)等。

(2)反 J 型 即生态位指数随根系径级的增加而降低,<1mm 径级根系的生态位指数最高,因此也可称作细根型。属于这

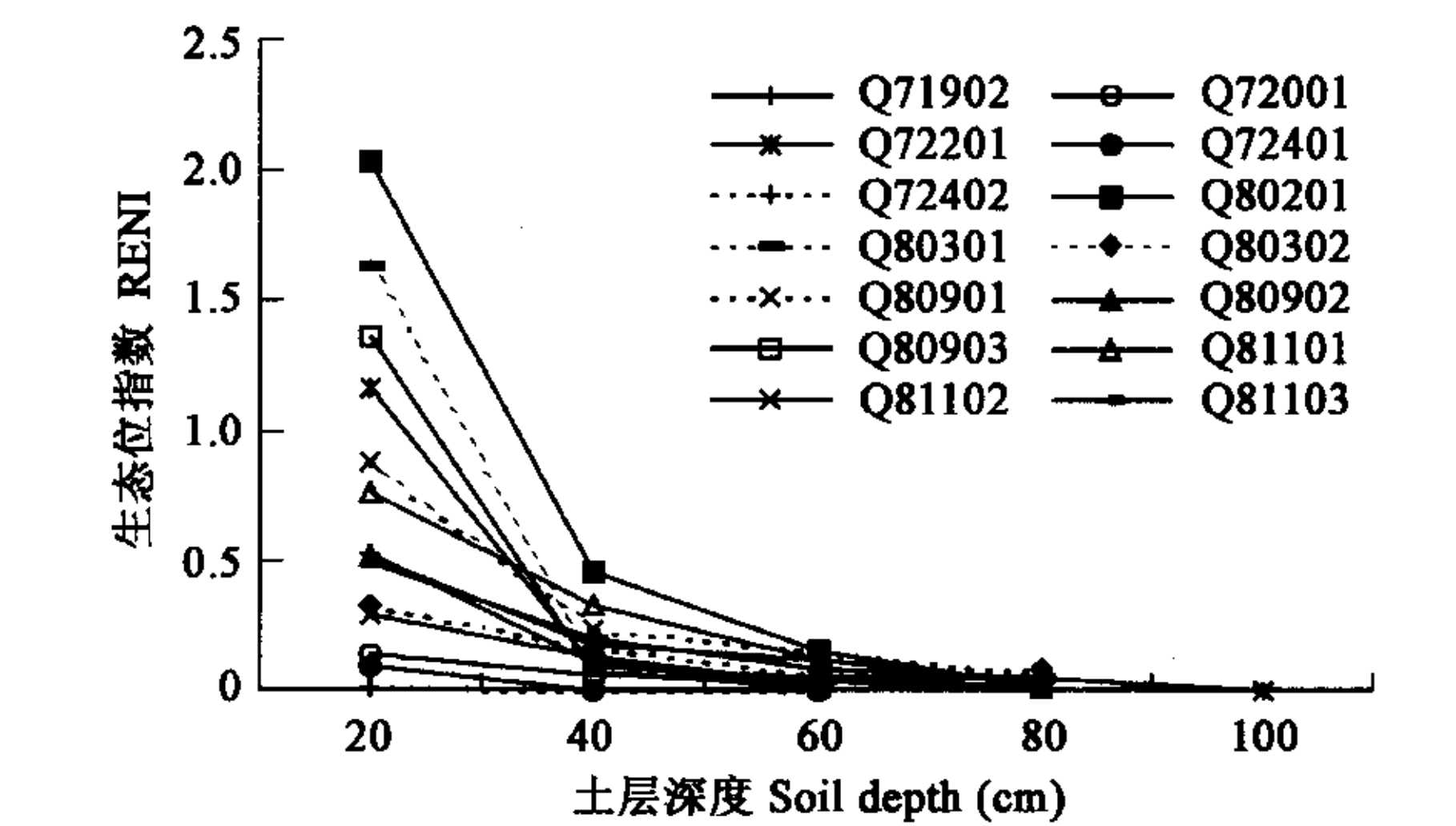


图 1 不同群落根系生态位指数与土层深度的关系
Fig. 1 Relationship between soil depth and RENI of different plant communities

种植类型的植物群落主要有:Q71901(退耕地川赤芍群落)、Q80302(山杨天然次生林)、Q72201(退耕地青海云杉人工林)、Q72301(白桦天然次生林)、Q72401(弃耕地杂草)、Q80903(退耕地中国沙棘人工林)、Q81103(退耕地青海云杉+中国沙棘人工林)以及农耕地的小麦(Q81001)、豌豆(Q72402)。

表 3 主要植物群落类型根系生态位指数与径级间的回归模型及参数

Table 3 Regression models and parameters between RENI and root diameters of main phyto-communities									
标准地编号 Quadrangle No.	回归模型 Regression model	判定系数 R^2	自由度 DF	F 值 F value	F 检验 Significant F	系数 b_0	系数 b_1	系数 b_2	系数 b_3
Q71901	S	0.993	2	277.59	0.004	-5.2732	1.2083		
Q71902	Quadratic	0.993	1	66.84	0.086	0.4408	-0.1796	0.0188	
Q72001	Quadratic	0.998	1	216.84	0.048	0.0324	-0.0131	0.0040	
Q72201	Inverse	0.993	1	134.63	0.055	-0.2361	0.7522		
Q72301	Inverse	0.977	2	83.41	0.012	-0.0017	0.1105		
Q72401	Inverse	0.997	2	777.75	0.001	-0.0086	0.0458		
Q72901	Cubic	0.996	1	86.89	0.079	0.1834	-0.1459	0.0378	-0.002
Q80301	S	0.956	3	65.75	0.004	-2.4687	0.1898		
Q80302	S	0.987	2	147.65	0.007	-2.7379	0.8806		
Q80901	Inverse	0.928	3	38.45	0.008	0.1476	0.2039		
Q80902	Inverse	0.853	3	17.39	0.025	0.0502	0.1892		
Q80903	Power	0.984	2	126.01	0.008	0.3599	-1.6391		
Q81002	Quadratic	0.942	2	16.17	0.058	0.0263	-0.0101	0.0010	
Q81102	Cubic	0.997	1	115.78	0.068	0.2056	-0.1016	0.0192	-0.001
Q81103	Inverse	0.976	3	120.36	0.002	0.1206	0.0682		

(3)S 型 即生态位指数在小径级较高,然后逐步下降至 3~5mm 径级时达最小,在 5~10mm 径级时反弹达到最高或次高值,>10mm 径级又下降,呈 S 形。属于这种类型的植物群落主要有:80902(退耕地华北落叶松人工林)、81201(退耕地青杨+中国沙棘人工林)等。

(4)U 型 即从小径级开始,生态位随着径级增加而下降,但在 5~10mm 径级或>10mm 后生态位指数又变为上升,而呈不等高 U 型,一般左高右低,即<1mm 毛根的生态位指数高于>10mm 生态位指数。属于这种类型的植物群落主要有:Q71902(退耕地华北落叶松人工林)、Q80901(退耕地青海云杉人工林)、Q80201(青海云杉+白桦天然次生林)等;Q81002(耕地作物油菜)也基本上属于这一类型,只不过为左低右高分布。

在上面的 4 种类型中,可以发现虽然青海云杉在 3 种类型中都有分布,但细加推敲就可发现,这些显然系青海云杉的不同群落类型所致:J 型为天然次生林;反 J 型为呈疏林、密生有杂灌草的退耕地青海云杉人工林地;U 型为青海云杉+白桦天然次生林,以及退耕地青海云杉+中国沙棘混交林(其中 Q80901 类型实际上原为与中国沙棘的混交林,青海云杉郁闭后中国沙棘

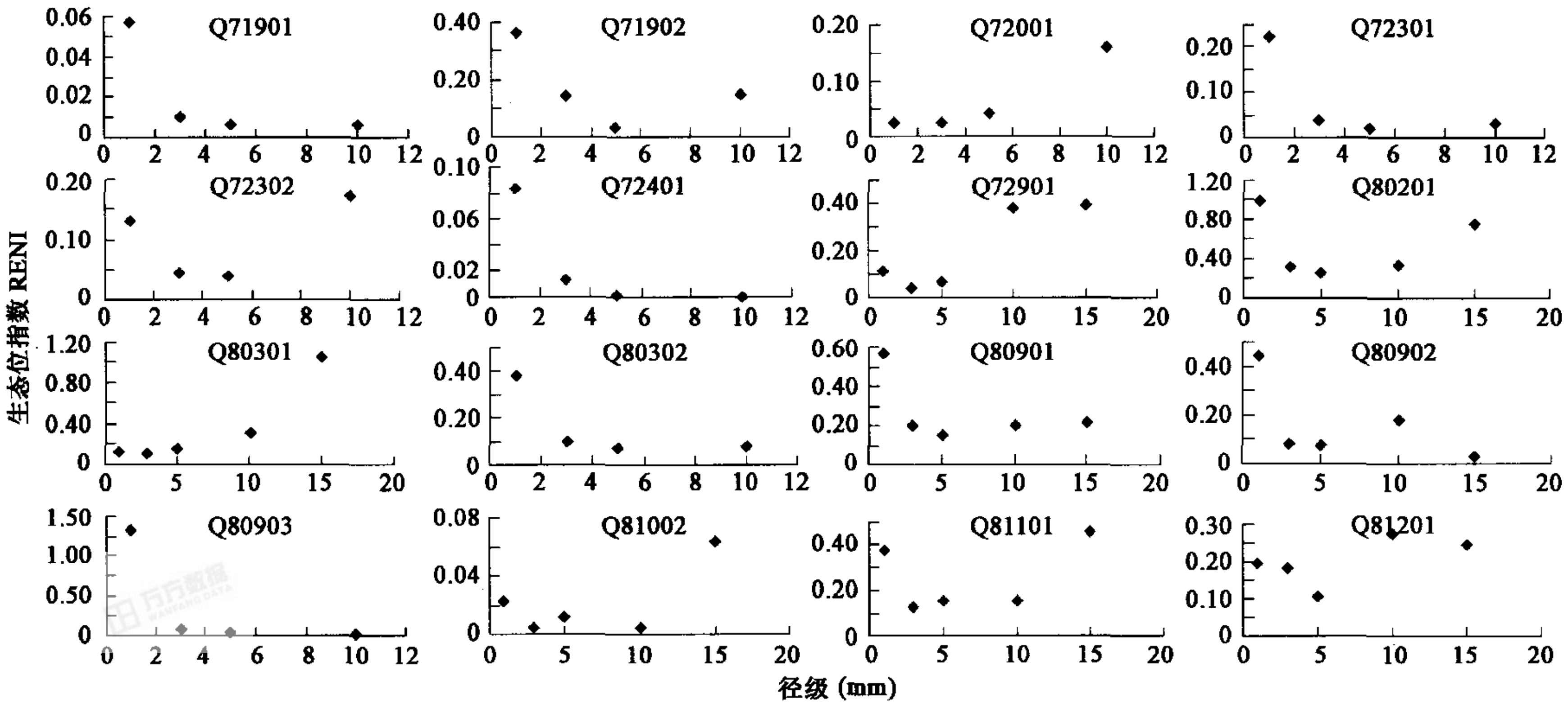


图 2 植物群落根系生态位指数与径级的关系

Fig. 2 Relationship between root diameters and RENI of plant communities

被伐除)。从总体情况来看,各种植物群落的径级分布还是有章可循的,均反映着植物群落根系与生态环境的不同适应结果。其中J型多是粗根-深根型植物群落根系,固土性能较好;反J型多是细根-浅根型植物群落根系,抗冲蚀性能较好;S型、U型为上述2种之间的过渡型。本文是在气候、地形、土壤等生态环境条件基本相似情况下所做的研究,但应该看到,影响根系径级分布的因素很多,土壤层次、厚度、结构、质地等均是十分重要的影响因子。

2.3 退耕地人工林、天然林与耕地作物的根系生态位对比

植物根系生态位指数综合反应了植物根系在结构、功能等多方面的信息,可以用来作为主要参数,就退耕地人工林与天然林、农作物的根系之间进行直接对比,以探讨耕作农作物经退耕变换为人工林群落根系后,根系生态位指数的变化情况。各类对比生态位指数见图3。

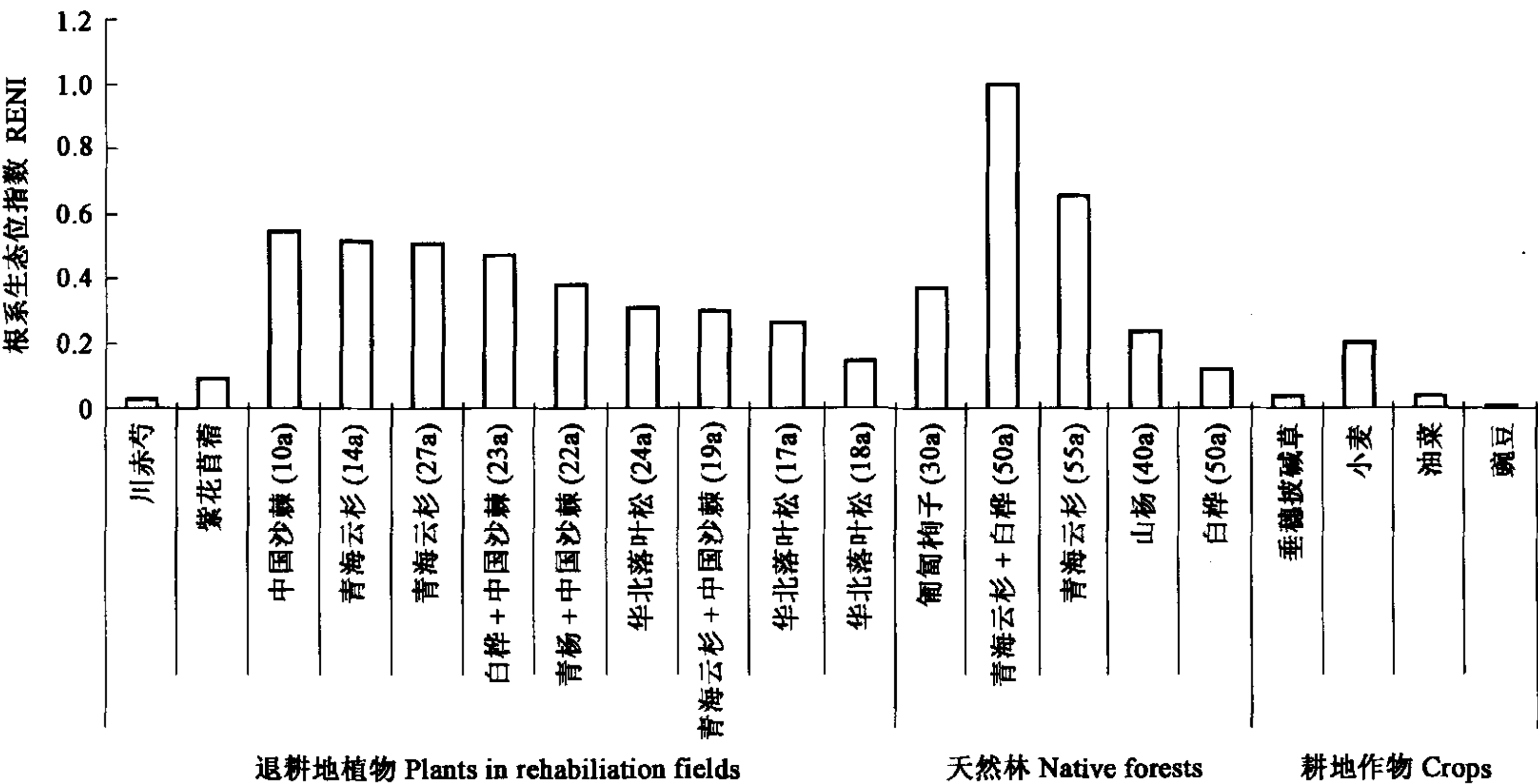


图3 不同起源植物群落根系生态位指数的比较

Fig. 3 Comparison of RENI of different origins of phyto-communities

可以发现,青海云杉+白桦、青海云杉这2种天然林类型的根系生态位指数明显高于其它各类型,其林龄均在50年以上,所分布的立地条件是自然选择的结果,并未遭到人类破坏,因此根系生态位指数最高是不足为奇的。但令人欣喜的是,退耕地人工林的生态位指数也很高,并且许多类型都高于白桦、山杨等当地天然次生林先锋树种以及当地大多数主要种植作物。说明了在退耕地中选择适宜的植物进行植被恢复重建,不仅完全有可能在植物群落的冠层结构方面,而且在土壤中根层结构上,也逐步逼近甚至超过天然植被类型。青海云杉+中国沙棘、中国沙棘、青海云杉为退耕地根系生态位最高的3种植物配置模式。同时也注意到,小麦根系生态位指数也并不是最低,这与多年来筛选出来的适应当地自然条件的主栽作物品种地位是不无关系的。

就生态位指数的平均值来看,天然林为0.478,退耕地人工植被群落为0.324,农作物为0.072,天然林仍然独占鳌头。但也注意到,虽然退耕地人工植被较低,但已较为接近天然林,其生态位指数平均值占天然林的67.8%;而耕地作物最小,其平均值仅占天然林的15.0%,占退耕地植物的22.1%。退耕地植物根系生态位在这一序列中,已明显高于其“出身地”的耕地,而与天然林地较为接近,客观反映了退耕地植物群落正在通过深根性、浅根性根系的多层次“加筋”分布^[17],在发挥其对植物地上部分机械支撑作用的同时,通过根系充分伸展,合理利用土体中的营养和水分空间,有效发挥了根系固持、网络和改良土体的作用。

2.4 影响根系生态位的主要生物学因素分析

影响植物群落根系生态位的因素除生态环境等外在因素外,主要还包括植物群落自身地上与地下生物量等内在生物学因素。下面讨论影响植物群落根系生态位的两大类主要因素,其中一类为地上部分生长指标,另一类为根系自身的多样性等群落学指数。

2.4.1 植物群落地上部分与根系生态位的关系分析 许多研究结果表明^[18~20],植物地上、地下部分虽然分别占据着不同层次的生态空间,但是两者之间存在着许多关联。选用林龄、植物层数、总盖度、平均高、鲜重生物量等地上部分因子,与根系生态位指数进行逐步回归的结果表明,地上部分鲜重生物量是影响根系生态位的主要因子,它们之间呈极显著正相关(可靠性99%)。其回归模型为:

$$R = 0.0005693W + 0.183$$

式中, R 为根系生态位指数; W 为鲜重生物量 (t/hm^2)。

回归模型的方差分析表明, F 值为 25.733, F 检验极显著, 达到 99.9% 的可靠性要求。植物地上、地下部分之间存在着很好的正相关关系, 合理经营地上部分, 是促进地下部分健康生长, 进而获得更大根系生态位的重要手段。

2.4.2 植物群落根系的群落学指数与根系生态位指数的关系分析 影响根系生态位指数的生物学因素, 还包括通过根系层径级重要值计算出的所谓根系群落学指数, 其中 Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数之间的关系见图 4。Simpson 优势度指数与 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数均呈负相关, 根系层次、径级越少, 优势度越高, 多样性、均匀度越低, 说明根系层、径级十分单一; 而 Shannon-Wiener 多样性指数与 Pielou 均匀度指数、丰富度之间均呈正相关, 根系层、径级数越多, 根系多样性越高, 丰富度也越高, 根系之间越均匀。

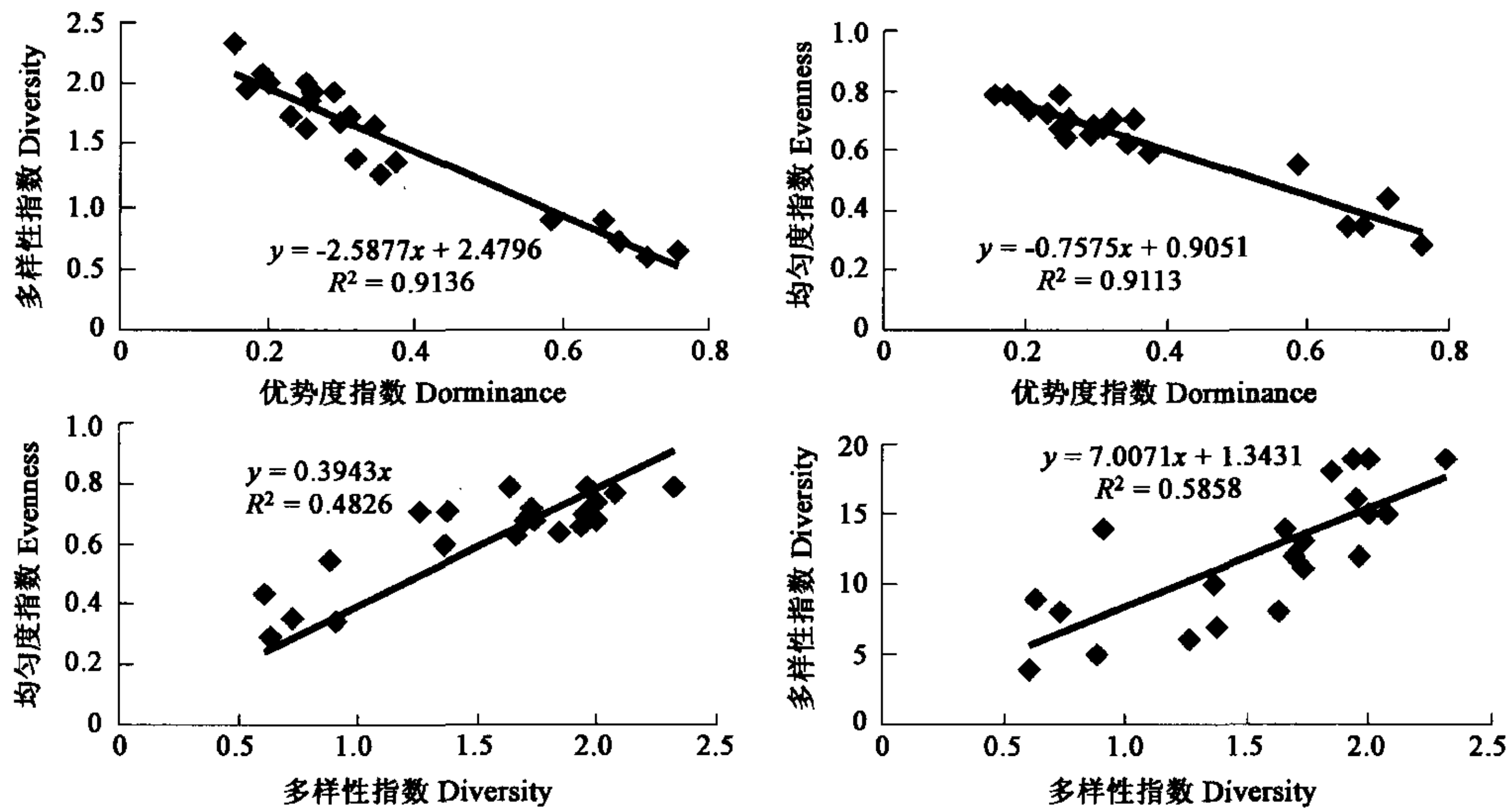


图 4 植物群落根系多样性指数之间的关系

Fig. 4 Relationship among diversity indexes of phyto-communities

通过逐步回归, 发现根系生态位指数与丰富度之间呈显著正相关, t 检验、 F 检验均达到回归显著程度 (可靠性均为 99.1%), 判定系数 $R^2 = 0.655$, 表明根系生态位指数变异中有 65.5% 系由丰富度所引起。回归模型为:

$$E' = 0.02924R - 0.0484$$

式中, E' 为修正后的根系生态位指数; R 为丰富度。

丰富度在本文中的实际含义, 是指某一根系的层径级数, 亦即分布于不同土壤层次的不同根系径级数, 在反映不同粗度根系种类丰富程度的同时, 还反映了根系的分布深度。根系分布深度越大, 丰富度也越大。因此丰富度与根系生态位指数呈正相关顺理成章。

植物群落根系的生态位指数、各种根系群落学指数, 与植物群落地上部分生物量之间, 存在着明显的相关关系, 它们之间交相呼应, 共同反映着植物群落的多种特征。这一结论进一步验证了本文提出的这一生态位指数的可行性、可靠性和科学性。

3 讨论与结论

生态位是指植物群落内一个种与其它种的相关位置, 或者说是指每个种在群落中的时空位置及其机能关系^[21]。群落中每一个种必须具有它自己的生态位。物种的生态位具有特有性、层次性、区域性、时效性、可调性、相对稳定性和定量可测性^[22]。生态位既是群落种间关系的结果, 又是群落特性的发生与发展、种系进化、种间竞争和协同进化活力的原因^[23]。所谓群落内种间关系等, 一般所指均为地上部分。而在地下根系之间, 实际上也存在多方面时空与机能联系, 这种关系可定义为根系生态位, 在本文中又以根系生态位指数作为其衡量指标, 以表征植物群落根系在土壤中的空间位置、在土壤梯度上的位置及在物质循环、能量流动和信息传递中的作用等多方面特征。这与通常用的生态位宽度等指标略有不同, 后者仅指一个生物学单位 (种或种群) 所利用的各种不同资源的总和^[24]。

仿照群落生态学研究方法将植物群落根系视为“标准地”, 分布于每个土体层次的每个径级根系视为“植物种”, 根量、根长、根数作为“植物种”的观测变量。指标维具有不同的量纲。如果按照植物群落中“重要值”的概念, 即取相对根量、相对根长和相对根数, 然后相加得重要值, 则在同一植物群落根系 (亦即“标准地”) 内是可以进行相互比较的, 但在不同植物群落根系间无法直

接对比,因为它们的重要值总和均为一恒定常数 300(按 3 指标)。如果按“综合优势比”的方法^[25],虽然各植物群落的综合优势比发生了变化,群落之间可以进行有限度对比,但这种计算方法又受制于植物群落中最大指标值的制约。因为,群落不同,各最大指标值也不同。因此,群落最大指标值越大,对其评价越为不利;群落最大指标值越小,评价反而相对有利。

针对上述情况提出了将研究区域作为一个系统,将这一系统中所有植物群落,统一选用指标最大值,在纵向(即相对于指标维的不同指标)用上限效果测度公式统一进行归一化处理,然后在横向(土层、径级间,简称层径级)进行合并运算,得出层径级根系参数,这一参数定义为层径级根系生态位指数;而将某一群落各层径级生态位指数之和,定义为植物群落根系生态位指数。层径级生态位指数是对根系综合特征进行描述的一种十分重要的方式,主要通过作为客体的生态环境空间垂直分布和作为主体的生物根系径级分布 2 个方面的特征来综合反映。

植物群落根系生态位指数,较为科学、客观、全面地反应了植物群落根系的综合特征,并有着严谨的生态学、统计学理论作为基础,可操作性强。应用这一指数,对青海省大通县退耕地林草植物、天然林及农作物等植物群落根系进行了系统研究。研究结果表明:

(1)大部分植物群落根系垂直空间分布格局为典型的表层聚积生态位型,即表土层 0~20cm 根系生态位指数明显高于其它层次;但其中也有层次间过渡较为和缓,亦即土层间生态位逐步下降的根系类型。不同的根系类型是植物群落自身特征与生态环境间相互适应的结果。表层较高的根系生态位指数,代表着分布有较多不同粗度的根系类型,将会通过根系对土粒的粘结、网络、固持作用,提高植物群落防冲抗蚀的功能。

(2)根系生态位径级分布格局可分为 J 型、反 J 型、S 型和 U 型。J 型多是粗根-深根型植物群落根系,粗壮根系对土壤的加筋作用,有助于提高植物固土性能;反 J 型多是细根-浅根型植物群落根系,表层土壤中密集分布的细根,可有效提高土壤抗冲蚀性能;S 型和 U 型为上述 2 种之间的过渡类型。

(3)退耕地植物群落根系生态位指数较为接近天然植被根系,而明显高于其前期类型——农作物的根系。农作物根系生态位指数最小,其平均值仅为天然林根系的 15.0%,为退耕地植物根系的 22.1%。青海云杉+中国沙棘、中国沙棘、青海云杉为提高退耕地根系生态位的 3 种最优植物配置模式。退耕还林还草工程是一项有效增加根系生态位、提高根系多方面功能的重要手段。

(4)根系生态位指数与植物群落地上部分鲜重生物量、根系丰富度呈显著正相关。植物群落地上、地下部分之间存在着良好的正相关关系。合理经营植物群落,促进地上部分生物量,同时通过不同类型植物间混交、间作等手段,是提高根系生态位,进而发挥其多种生态功能的重要途径。

References:

- [1] Chen W, Xue L. Root interactions: competition and facilitation. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(6):1243~1251.
- [2] Huang J H, Han X G, Chen L Z. Advances in the research of (fine) root biomass in forest ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, **19**(2):270~277.
- [3] Li Y, Xu X Q, Zhu X M. Study on validity of improving soil physical properties by artificial Chinese pine roots in the Loess Plateau. *Scientia Silvae Sinicae*, 1993, **29**(3):193~198.
- [4] Li Z W, Yang Y S, Wu Y X, et al. Study on roots of mixed forests of Chinese fir and phoebe. *Chinese Journal of Ecology*, 1993, **12**(1): 20~24.
- [5] Liu J J. A review on root ecology of forest trees. *Journal of Northwest Forestry College*, 1998, **13**(3):74~78.
- [6] Wang R Z. The niche breadths and niche overlaps of main plant populations in *Leimus chinensis* grassland for grazing. *Acta Phytocologica Sinica*, 1997, **21**(4): 304~311.
- [7] Yu S X, Orlioci L. Multivariate measure of niche breadth. *Acta Ecologica Sinica*, 1994, **14**(1): 32~39.
- [8] Yang W Q, Song G Y. Theory of soil niche and its application. *World Science and Technology Research and Development*, 2001, **23**(2): 21~23.
- [9] Borm W. *Roots study method*. Beijing: Science Press, 1985. 18~95.
- [10] Zhao J R, Sun L D, Zhu J Z. *Study on shrubs for soil and water conservation in the Loess Plateau*. Beijing: China Forestry Press, 1994. 33~34.
- [11] Hu J Z. *Experimental method of plant introduction and cultivation*. Zhenzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2002. 101~108.
- [12] Shan J P, Tao D L. Overseas research trends on tree fine roots. *Chinese Journal of Ecology*, 1992, **11**(4):46~49.
- [13] Zhu Q K, Zhu J Z. *Sustainable management techniques of converting cropland into forestland and grassland in the Loess Plateau*. Beijing: China Forestry Press, 2003. 179~186.

- [14] Ge F. *Modern ecology*. Beijing: Science Press, 2002. 251~258.
- [15] Song R Y, Li Q F, Niu C J, *et al.* *Basic ecology*. Beijing: Higher Education Press, 2002. 140~144.
- [16] Hutchinson G E. *A treatise on limnology. Vol. Geography physics and chemistry*. New York: Wiley, 1957. 11~53.
- [17] Zhou D P, Zhang J Y. *Engineering technique of plant protection for slope*. Beijing: China Communications Press, 2003. 62~78.
- [18] Wang C, Jing Y H, Liu J S, *et al.* Root biomass of natural Japanese red pine in Yanbian area. *Journal of Beijing Forestry University*, 1999, **21**(1): 44~49.
- [19] Liang J P, Liang Y Z, Zhang Y L, *et al.* Study on the root biomass of *Pinus Tablaeformis* Carr. *He'nan Science*, 1999, **17**(special): 77~79.
- [20] Hu J Z. Discussion on fuzzy cluster and rules of growth and distribution of seabuckthorn roots. *Scientia Silvae Sinicae*, 1992, **28**(1): 22~29.
- [21] Grinnell, J. The niche-relationship of the California thrasher. *Auk*, 1917, **34**: 427~433.
- [22] Zhang G M, Xie S C. Development of niche concept and its perspectives; a review. *Chinese Journal of Ecology*, 1997, **16**(6): 46~51.
- [23] Zhou J L, Zheng S Z, Yang C. *Plant population ecology*. Beijing: Higher Education Press, 1992. 34~97.
- [24] Song Y C. *Vegetation ecology*. Shanghai: Eastern China Normal University Press, 2001. 45~61.
- [25] Li B. Survey and analysis for phyto-community. In: Jiang S ed. *Method of grassland ecology*. Beijing: Agricultural Press, 1989. 45~79.

参考文献:

- [1] 陈伟, 薛立. 根系间的相互作用-竞争与互利. *生态学报*, 2004, **24**(6): 1243~1251.
- [2] 黄建辉, 韩兴国, 陈灵芝. 森林生态系统根系生物量研究进展. *生态学报*, 1999, **19**(2): 270~277.
- [3] 李勇, 徐晓琴, 朱显谟. 黄土高原油松人工林根系改善土壤物理性质的有效性研究. *林业科学*, 1993, **29**(3): 193~198.
- [4] 李振问, 杨玉盛, 吴耀溪, 等. 杉木火力楠混交林根系的研究. *生态学杂志*, 1993, **12**(1): 20~24.
- [5] 刘建军. 林木根系生态研究综述. *西北林学院学报*, 1998, **13**(3): 74~78.
- [6] 王仁忠. 放牧影响下羊草草地主要植物种群生态位宽度与生态位重叠的研究. *植物生态学报*, 1997, **21**(4): 304~311.
- [7] 余世孝, 奥罗西 L. 物种多维生态位宽度测度. *生态学报*, 1994, **14**(1): 32~39.
- [8] 杨万勤, 宋光煜. 土壤生态位及其应用. *世界科技研究与发展*, 2001, **23**(2): 21~23.
- [9] 伯姆 W. 薛德榕译. 根系研究法. 北京: 科学出版社, 1985. 18~95.
- [10] 赵金荣, 孙立达, 朱金兆. 黄土高原水土保持灌木研究. 北京: 中国林业出版社, 1994. 33~34.
- [11] 胡建忠. 植物引种栽培试验研究. 郑州: 黄河水利出版社, 2002. 101~108.
- [12] 单建平, 陶大立. 国外对树木细根的研究动态. *生态学杂志*, 1992, **11**(4): 46~49.
- [13] 朱清科, 朱金兆. 黄土区退耕还林可持续经营技术. 北京: 中国林业出版社, 2003. 179~186.
- [14] 戈峰. 现代生态学. 北京: 科学出版社, 2002. 251~258.
- [15] 孙儒泳, 李庆芬, 牛翠娟, 等. 基础生态学. 北京: 高等教育出版社, 2002. 140~144.
- [17] 周德培, 张俊云. 植被护坡工程技术. 北京: 人民交通出版社, 2003. 62~78.
- [18] 王成, 金永焕, 刘继生, 等. 延边地区天然赤松林单木根系生物量的研究. *北京林业大学学报*, 1999, **21**(1): 44~49.
- [19] 梁建萍, 韩有志, 张云龙, 等. 油松人工林根系生物量的研究. *河南科学*, 1999, **17**(专辑): 77~79.
- [20] 胡建忠. 沙棘根系模糊聚类及生长分布规律的探讨. *林业科学*, 1992, **28**(1): 22~29.
- [22] 张光明, 谢寿昌. 生态位概念演变与展望. *生态学杂志*, 1997, **16**(6): 46~51.
- [23] 周纪伦, 郑师章, 杨持. 植物种群生态学. 北京: 高等教育出版社, 1992. 34~97.
- [24] 宋永昌. 植被生态学. 上海: 华东师范大学出版社, 2001. 45~61.
- [25] 李博. 植物群落的调查与分析. 见: 姜恕主编. 草地生态研究法. 北京: 农业出版社, 1989. 45~79.