

# 西北地区干旱化趋势及水盐失衡的生态环境效应

徐恒力 周爱国 肖国强 支兵发 叶含春

(中国地质大学工程学院, 武汉 430074)

**摘要:** 基于对西北地区干旱化趋势的讨论, 研究了西北内陆封闭盆地水盐迁移聚集的系统动力学模式, 阐明了盆地浅表积盐与水盐失衡的根本原因. 在此基础上, 探讨了水盐分布与生态适宜性之间的内在联系以及水循环节律的变化对土壤生态指数时空分布的影响, 提出建立西北地区各物种的生存域及土壤生态指数对西部大开发具有重要意义. 此外, 还讨论了内陆盆地水库工程兴建与灌溉技术选择问题.

**关键词:** 气候干旱化; 水盐失衡; 生态环境效应; 生态适宜性; 土壤生态指数.

**中图分类号:** P641.12; S274.6; X171.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-2383(2000)05-0499-06

**作者简介:** 徐恒力, 男, 教授, 1945年生, 1967年毕业于北京地质学院, 1983年毕业于武汉地质学院北京研究生部, 获硕士学位, 现从事地下水系统理论、水资源科学管理、环境地质等方面的研究.

干旱化气候的持续发展是我国西北地区水资源匮乏、生态环境脆弱的根本原因. 这种不利的自然条件不仅长期制约着西北地区经济快速增长, 而且加剧的干旱化也是目前开发大西北所面临的关键性难题.

水资源匮乏、生态环境脆弱的系统动力学机制在于盆地系统内水量的负均衡和盐分向地表、盆地中心聚集的大趋势. 在天然条件下, 土壤的水、盐背景值及其分布决定着植物的种群、群落自然选择的生存条件. 在开发利用水资源的人为活动条件下, 局域水循环的节律会发生变化并导致水盐失衡的加剧, 进而影响土壤的水、盐分布格局, 使植被向着逆向演替的方向发展. 因此, 开展水、盐分布变化及其生态环境效应的研究应成为西北开发过程中一个具有重要理论价值和实用意义的课题.

## 1 西北地区干旱化趋势与水盐失衡

近年来, 许多科学家从各种角度揭示了我国西北乃至北半球中纬度地区持续干旱的发展规律. 其中最具有说服力的证据来自两个方面的事实: 一是全球沙漠化分布格局的变化; 二是青藏高原隆升导致

的环境变异.

沙漠是极端干旱气候的产物, 将距今 18 ka 全球活动沙丘分布图与现代全球活动沙丘分布图(图1)相对照<sup>[1]</sup>, 可以看出, 世界上的沙漠主要分布在南北回归线附近, 现今多集中在北半球的中纬度地区. 而我国西北则是全球沙漠化增长速度最快的地区. 对此, 德国科学家 Claussen 认为: “地球轨道和地轴倾角的变化是造成全新世中期到目前沙漠分布格局变化的主要原因”<sup>①</sup>. 上述发展趋势表明, 我国西北正处于干旱快速发展的时期.

此外, 地质学的研究<sup>[2,3]</sup>也提供了西北干旱化持续发展的证据. 由于印度板块的推挤和太平洋板块的拉张作用, 自上新世开始的 3 Ma 间, 青藏高原由平均海拔高度 1 000~2 000 m 升至 4 000~5 000 m, 天山上升了近 5 000 m, 秦岭上升了近 2 000 m. 曾经起伏较小的我国宏观地形呈现出以青藏高原为屋脊, 向太平洋方向梯级下降的态势. 受此影响, 我国宏观气候也由纬向分带变为垂向分带为主. 受西部高原、山地的阻挡, 北半球盛行的西风流(行星西风)分成两支, 北支从西伯利亚—蒙古国一线进入我国, 南支与印度洋暖湿气流汇合从西南入境. 它们在我国东部汇合, 并与东南沿海入侵的太平洋副热带

收稿日期: 2000-05-16

基金项目: 湖北省废物地质处置与环境保护重点实验室开放基金.

①见“地球轨道变化导致撒哈拉变成沙漠”一文, 程也摘自 AMS NEWS LETTER. Vol. 20.

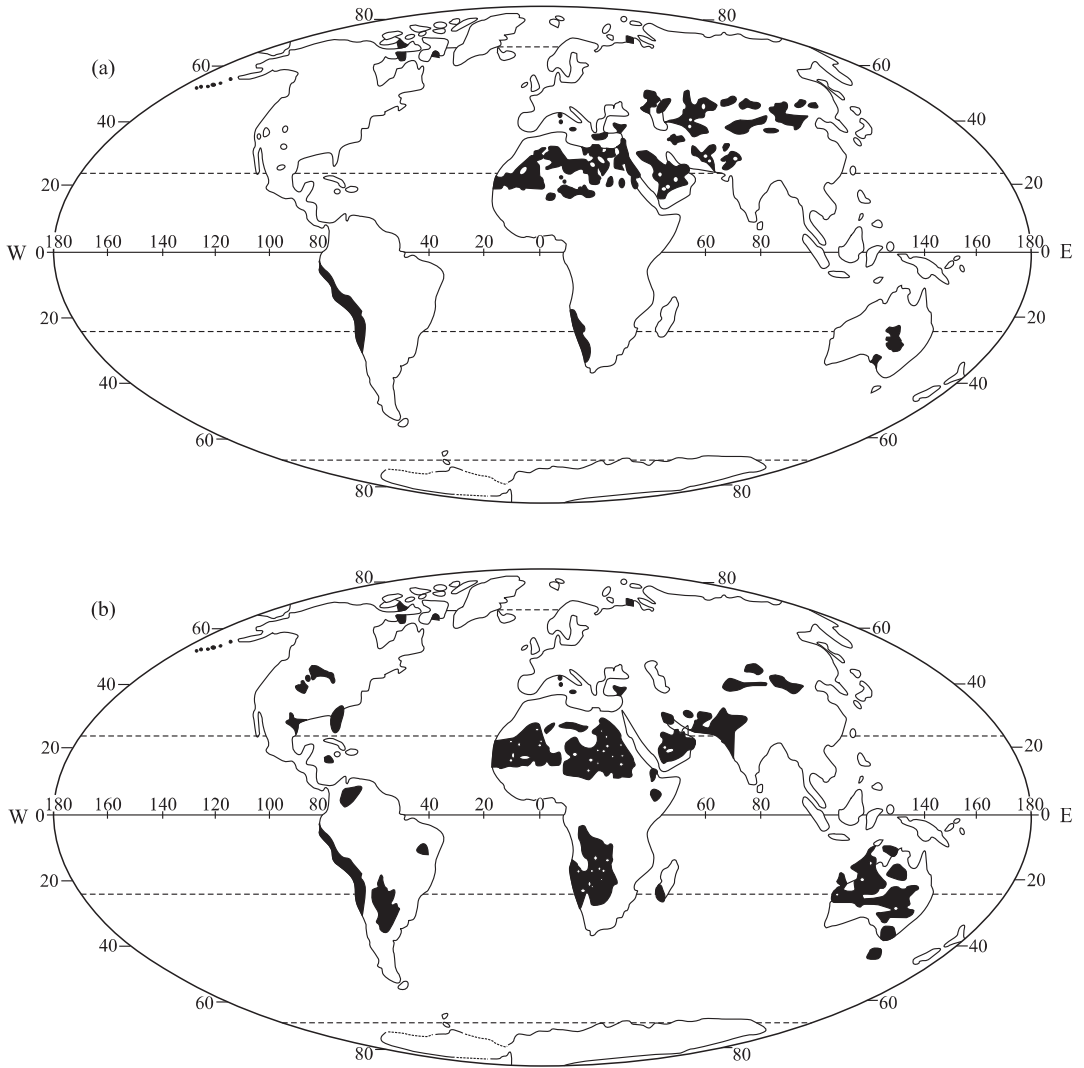


图 1 全球 18 ka 前沙漠与当今沙漠分布示意<sup>[1]</sup>

Fig. 1 Maps showing desert distribution before 18 ka and at present

a. 现代全球活动沙丘的分布; b. 末次冰期最盛期(距今 18 ka)全球活动沙丘的分布; 黑色. 活动沙丘

高压交替推进、对峙,从而形成了控制我国水资源时空分布的现代四大水文循环系统,即太平洋水文循环系统、印度洋水文循环系统、北冰洋水文循环系统、鄂霍次克海水文循环系统<sup>[4]</sup>,而我国西北恰恰位于这 4 个水文循环系统难以到达的空缺地带。尽管西风流可以携带少量大西洋水汽进入西北地区,但在高原、山地的屏障作用下,只能从高空掠过,近地大气层水分含量很少,致使盆地中降水稀缺。不难看出,青藏高原隆升导致气候系统各种反馈机制的调整和放大,是我国西北持续干旱的另一原因。这种地形和气候格局决定了我国由东南向西北逐渐干旱的自然景观,从而在西北发育了世界上最大的中纬度沙漠,沙漠外围则形成了厚层的黄土堆积。

从上述现象可得两点认识:一是这种地质时空尺度的干旱化趋势有着非常长的延迟和放大效应,意味着我国西北地区的气候干旱化将长期存在;二是这种趋势是人力不可抗拒的。因此,西北地区的生态建设是长期而艰巨的工作,并且只能通过改善局域生态环境来抑制或减缓区域性的气候干旱化。

西北地区干旱气候带来的直接结果是水资源极端匮乏和脆弱的生态环境,具体表现为水盐失衡,导致植物种群向极端的方向(耐旱、耐盐)演替。西北内陆盆地水分的输入主要来自降水较丰的山区。在山区,降水量最大达 600~700 mm/a,盆地降水为 200 mm/a 以下,甚至不足 50 mm/a,而盆地蒸发量却高达 2 000~3 000 mm/a<sup>[5]</sup>,盆地降水稀缺、蒸发力大

的气候条件决定了进入盆地的水分最终以蒸发输出的方式为主,水分的平衡关系十分脆弱,水分收支均衡出现的概率很高。与此伴随的是,由于基本没有盐分排泄去路,盆地将始终处于盐分积累过程中,尤其是在局部流动系统和区域流动系统的汇区,地表水、地下水、土壤水中的含盐量具有不断增高的现象。

大量事实表明,这种干旱化趋势已经在中、小时空尺度上可以清楚地识别。最近几十年间,罗布泊的消失<sup>[6]</sup>,青海湖水位的持续下降,湖水矿化度逐渐增高<sup>[7]</sup>,慕士塔峰、博格达峰、祁连山冰川的退缩<sup>[8]</sup>,新疆阿勒泰、伊犁地区,河西走廊的黑河与石羊河流域林草甸面积大幅度减少、种群退化<sup>[9~11]</sup>等等,虽然不排除人为活动的影响,但在人口稀少、生产力相对较低,对自然资源依赖程度高而人均资源消耗量远远不如东部地区的西北地区,如此大规模的生态退化,显然与区域干旱化发展趋势有着重要的联系。因此,进行生态建设和开发水土资源时必须正视目前水盐失衡的事实,并根据水、盐迁移、聚集的客观规律采取科学对策。

## 2 内陆封闭盆地水分转化与盐分迁移聚集的系统动力学模式

西北新生代盆地是陆表松散岩土和可溶盐聚集的重要场所,也是地表水、地下水的汇区。在地形势的控制下,大气降水和由周边山地冰雪融水转化而成的地表水、地下水,作为溶剂和载体,可以将山区岩石和土壤母质中的可溶盐带入盆地,使内陆封闭盆地盐分不断增加,且存在向地表和盆地中心集中的宏观趋势,并按一定的系统动力学模式运移、聚集。

(1)大气降水是盐分的主要输入方式。我国干旱内陆盆地大气降水中的含盐量可达几十 mg/L,甚至 0.2 g/L,比我国沿海地区高出 3~4 倍。由于降水量很小,一般难以形成对地下水的有效补给,其水量大多滞留在土壤和包气带中,地表蒸发作用使水失盐留,日积月累,土壤表面形成自然的盐分积累,在潜水埋深大于临界深度的细土平原,原生的盐渍土往往属于这种类型。

(2)地表水在盐分迁移过程的溶滤和盐分携带作用。发源于盆地周边地区的河流将山区的可溶盐带入盆地,在山口处地表水的矿化度一般小于 0.3

~0.5 g/L,水的化学类型以  $\text{HCO}_3 - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$  为主;进入中游的细土平原,受河水与下垫面的水-岩作用,以及地下水排泄的影响,河水的矿化度升至 0.6~0.8 g/L,水化学类型也随之复杂化,可以有  $\text{HCO}_3 - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$  和  $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 - \text{Mg} \cdot \text{Na}$  等多种类型;随着流程加大,河面蒸发,到尾闾湖区矿化度可以增加至数十 g/L,甚至更高。由于河水更新周期短,从源到汇一般只有数天到十几天,河面蒸发面积有限,所以在全盆地盐分迁移、聚集过程中,河流主要扮演溶滤和盐分携带者的角色。

(3)土壤水中的盐分聚集。由于降水稀少,蒸发蒸腾作用强烈,土壤中来自上层的水分输入严重匮乏。在地下水埋深小于临界深度的地区,土壤虽然可以获得地下水毛细上升的水量补充,同时也使盐分在土壤浅表聚集。难以见到在半干旱和湿润气候区所见到的土壤脱盐积盐交替的正常涨落现象。

(4)地下水的径流排泄形成的盐分迁移、聚集。地下水流动系统理论指出<sup>[12]</sup>,在地形稍复杂的盆地中,存在着以流面隔开的地下水局部流动系统和区域流动系统,前者嵌套在后者之上,现代水文循环形成的 90% 以上的地下水(包括山区侧向径流量、土壤水下渗量)均在此系统中循环交替<sup>[13]</sup>。受植物蒸腾、土面蒸发作用的影响,地下水在从局部源区向局部汇区迁移的过程中,其矿化度大幅度升高,可由盆地上游的 1.0~3.0 g/L 升至盆地中游的 10.0 g/L,甚至达到 16.0 g/L,致使各局部汇区潜水平埋深小于临界深度的地段的包气带和土壤的积盐作用大于脱盐作用,形成盐分含量上升态势。由于局部流动系统源、汇相间分布,且广布于盆地中部和腹地,在平面上表现为淡水区和高矿化的水化学屏蔽带相间分布特点,不同局部流动系统的水质类型往往只具有水质空间演化序列的某一片段。

地下水区域流动系统是由河流出口口的冲洪积扇地带的地下水强烈下渗区,经深部径流到盆地腹地(尾闾地带)地下水上升区的整体空间构成。研究表明<sup>[13]</sup>:来自盆地边缘的大气降水、山区的地表水下渗形成的地下水和侧向潜流,运移到离盆地边缘百余 km 的距离内,大部分转化成浅层地下水以泉或潜排的形式回返地表。因不受地表蒸发作用的影响,盐分主要来自源区和流程中产生的附加量,所以矿化度的增高、水质类型的递变速度较局部流动系统要慢。由区域源到盆地腹地的汇,可表现出由  $\text{HCO}_3 - \text{SO}_4 - \text{Cl}$  的正常的水质递变序列。正因如

此,在地表高矿化水分布区,可在深部打出淡水井。然而由于径流流程长、水岩作用充分,盐分会随流程不断增高,直至盆地腹地,上升水流与尾闾区的浅层高矿化水相遇,形成咸水湖甚至盐池,如河西走廊,黑河流域的居延海、石羊河流域的白宁海(现已干枯)(17 g/L)以及雅布赖山附近的雅布赖盐湖、吉兰泰盐湖等均属此类。

### 3 内陆封闭盆地水、盐分布与土壤生态适宜性

土壤是陆地植被生存、繁衍的主要环境因子。从某种意义上讲,野生植物对生存环境的选择主要是对土壤中水分、盐分(无机盐类、有机物)及温度等理化指标(即土壤生态指数)的选择。不同的指标背景就有不同的植物种群。在极其干旱的盆地腹地只生长胡杨、合头草、红砂、麻黄等超旱生植物,土壤含盐量高的地段,则分布着红柳、白刺等灌木。研究表明<sup>[14]</sup>,任何一种植物对水、盐、热的要求都有最佳值和可忍耐的极限值。例如,以胡杨、灰杨为代表的植物群落,最佳的水盐条件是潜水埋深在 1.0~5.0 m,  $\rho(\text{TDS})$  在 0.5~3.0 g/L,潜水埋深超过 10 m,  $\rho(\text{TDS})$  大于 5.0 g/L,它们就会处于抑制状态甚至死亡,由红柳取而代之。若水、盐条件继续恶化,红柳也会消失,土地将成为盐土和沙漠。西北内陆盆地之所以出现植被水平分带规律,除与气候分带有关外,上述 4 种水盐运移、聚集模式都发挥着重要作用。

在地表水分布区,植被种群具有沿纵向和横向变化的规律。总体表现为与河流相一致的条带状分布特点。河流的上游,往往以喜水、不耐盐的植被为主;随着河水盐分的增高,喜水、喜盐植物生长旺盛;到河流下游,则以喜水、耐盐植物为主;到河流终端的尾闾湖区,很可能因水中盐分过高成为寸草不生的不毛之地。上述规律在与河流垂直的方向上也有显示,只不过更多地取决于地下水埋深和矿化度等背景条件。

地下水往往呈面状分布,受局部流动系统的控制。局部流动系统的源区,往往矿化度较低,地下水埋深较大,常常分布耐旱植被群落;汇区地下水埋藏浅,矿化度较高,植物以喜水、耐盐种类为主。由于大气降水积盐效应、土壤水积盐作用与地表水、地下水中盐分分布格局相叠加,盆地内不同地段,可出现不

同植被及不同疏密程度的组合情形。所以,对水、盐、土和生物活性(可用 ATP 指标衡量)的背景开展野外调查,利用生态指数进行土壤的适宜性评价,就显得格外重要。考虑各种植物对水、盐、土、温度和 ATP 含量都有一定的要求,建立当地各物种的生存域(最佳值、极限值)及其与背景值之间的关系也应该是生态地质调查评价工作中一个不可缺少的内容。其意义在于:一方面可提供植物不同物种组成的群落共同生存的水、盐、土条件,为人工植被多样性选择提供依据;另一方面,有助于确定在水、盐、土条件变异时,各种野生物种退化消亡的顺序,以及在极端条件下,土地沦为盐土、沙漠还有多远的距离,以便针对不同情况提出保护原生植被的对策。

### 4 水循环节律的变化对土壤生态指数时空分布的影响

地表水和地下水是水资源的重要组成部分,同时又是最活跃的环境要素。我国西北五省区(陕、甘、宁、青、新)水资源总量只有  $2\,235 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ <sup>[15]</sup>,单位面积占有量不足全国平均值的 1/3。在人类与天然植被争水的矛盾已十分突出的现状条件下,当地水资源仅能维持脆弱的生态和经济发展最低的耗水需求。而人类对水资源的不合理开发利用无疑加剧了西北地区的生态退化趋势。不从发展节水经济,提高单位耗水经济产值的途径寻找出路,而将找水、大力开发水资源作为经济发展的支撑点,必然使已经十分恶劣的植被生态环境条件(水、盐、温度、ATP 等)进一步恶化。

人为活动尤其是水资源的开发利用,对土壤生态的影响是非常明显的。截蓄地表水、开采地下水的实质是用人工源汇取代或弱化天然源汇,在这种作用下,地表水、地下水乃至土壤水的时空分布均会发生改变,盐分的迁移、聚集过程也会与之相适应,形成新的时空格局。

提引地表水灌溉使天然河水的流程中增加了灌溉这一人工环节,从而延长了地表水在地表的滞留时间,且水量更为分散,在强烈的蒸发和下渗的双重作用下,土壤的积盐和脱盐过程趋于复杂化,灌溉弃水量也会给河流施加盐分增量。地表水从天然源到天然汇的运动周期也随之延长。利用地下水灌溉可能产生的另一个问题是,由于地下水的更新周期较

长,抽水灌溉会加快局部流动系统中水的交替过程,使循环周期变短,盐分的积累速度加快.在上述活动中,虽然蒸发会使地表水、地下水、土壤水提供给大气水的通量增加,但由于气流的影响,水分往往进入高空,输移到盆地之外,近地表的大气水分含量不会因此增多而形成有效降水.

正因为如此,目前西北灌区遇到的共同问题是开采地下水使水源地附近水位持续下降,导致土地沙化,而在灌区却出现地下水位持续上升引发土地盐碱化.据不完全统计<sup>[10]</sup>,20世纪60年代初,张掖地区分布沼泽及低湿草场约 $12 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,由于人为开发利用水资源,到20世纪80年代中期,已减少到 $9 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,全地区草场退化面积达 $43.19 \times 10^4 \text{ hm}^2$ .黑河下游在20世纪50年代曾分布连片茂密的沙枣、胡杨、红柳、梭梭、芦苇、芨芨草等灌木草甸,到20世纪70年代,胡杨、沙枣林减少了 $5.76 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,植被覆盖率大于70%~30%的灌木草场减少了 $327.18 \times 10^4 \text{ hm}^2$ .与此同时,土壤沙化和盐碱化面积迅速增加,仅中游地区新增沙化面积就比建国初期增加了 $82.14 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,盐碱地面积也在灌区范围内急剧增长.民勤盆地北部灌区在短短的20年间,由于抽水和灌溉,不仅出现沙化、盐碱化问题,使可耕地减少了34.8%,而且还波及到附近地区,使两倍于灌区面积的地区天然生态严重破坏.

“前车之鉴,后人之师”.下述问题应引起足够重视:(1)兴修水库工程问题.由于水资源匮乏,目前有人提出在西北加大兴修水库工程,以提高洪水利用率和人工调控能力.对此,我们认为,在西北这样的气候条件下,修建水库的得失应该予以重新分析.水库水面的形成,为蒸发提供了良好的条件.按当地蒸发力计算,每年湖面因蒸发造成的水量深度损失就可达2~3 m.如果考虑到水库水质浓缩导致水中盐分增加.那么,很可能因为水库的修建造成不应该有的损失,对此我们应汲取埃及尼罗河阿斯旺水库的教训<sup>[6]</sup>.(2)灌溉问题.大水漫灌一直被认为是陈旧而浪费水资源的一种灌溉方式,鉴于水资源的短缺,土地资源丰富,有人主张应该采取喷、滴、渗灌的节水灌溉方式,以提高水资源的利用率,扩大耕地面积.事实上,这种想法忽视了干旱地区的气候特点,大水漫灌固然费水,但在另一方面却发挥了洗盐、压盐功效,使土壤耕作层的盐分不超过作物的忍耐值.显然,在缺乏对水盐平衡和土壤盐分积累规律认真研究的情况下,提倡喷、滴、渗灌的结果很可能是人

为“晒盐”,加剧土壤盐化进程.因此,有必要对灌溉技术进行深入研究,确定切实可行的水资源规划和生态农业模式.

## 5 结论及建议

在未来相当长时间内,我国西北地区仍将持续干旱,其反馈作用将会使水资源数量进一步减少,导致严重缺水,水资源量仅能维持脆弱的生态和经济发展最低的耗水需求.在西北大开发过程中,我们面临的既有来自气候干旱化的挑战,又有如何协调水资源合理开发利用与生态保护两者兼顾发展的艰巨任务.从西北地区干旱化趋势出发,探讨内陆盆地水、盐的运动规律及其对生态环境的影响,对于正确制定水资源利用—生态建设的策略是至关重要的.

建立西北地区各物种的生存域(最佳值、极限值)及其与水分、盐分、温度、ATP等背景值之间的关系,科学评价土壤生态适宜性是生态地质调查评价工作中一个不可缺少的内容.要特别重视水循环规律的变化对土壤生态指数时空分布的影响,慎重对待水库工程兴修与灌溉技术选定问题.

### 参考文献:

- [1] Williams M A J, Dunkerley D L, DeDecker P. 第四纪环境[M]. 刘东生,译. 北京:科学出版社,1998. 106~112.
- [2] 刘晓东. 青藏高原隆升对亚洲季风形成和全球气候与环境变化的影响[J]. 高原气象,1999, 18(3): 321~332.
- [3] 施雅风,李志均,李炳元,等. 晚新生代青藏高原的隆升与东亚环境变化[J]. 地理学报,1999, 54(1): 10~20.
- [4] 胡方荣. 中国大百科全书(大气科学·海洋科学·水文科学)[M]. 北京:中国大百科全书出版社,1987. 724~725.
- [5] 王根诸,程国栋. 内陆河流域生态环境的空间变异特征[J]. 地理科学,1998, 18(4): 355~361.
- [6] 杨达源,阎国年. 自然灾害学[M]. 北京:测绘出版社,1993. 68.
- [7] 倪绍祥,巩爱歧,蒋建军,等. 环青海湖地区生态环境问题及其整治[J]. 资源科学,1999, 21(6): 43~46.
- [8] 沈灿. 水资源导论[M]. 北京:高等教育出版社,1989. 94.
- [9] 王根诸,程国栋,徐中民,等. 中国西北干旱区水资源利用及其生态环境问题[J]. 自然资源学报,1999, 14(2): 109~116.
- [10] 王根诸,程国栋. 近50年来黑河流域水文及生态环境

- 的变化[J]. 中国沙漠, 1998, 18(3): 233~238.
- [11] 陈同心. 河西走廊石羊河水土利用对下游供水量和生态环境的影响[J]. 水资源研究, 1991, 12(1): 44~50.
- [12] Tóth J. Gravity induced cross formation flow of formation fluid, Red Earth Region, Alberta, Canada: analysis, pattern and evolution [J]. Water Resources Research, 1978, 14(5): 805~843.
- [13] 久宁 В. И. 深部地下径流的研究方法[M]. 杨立中, 译. 北京: 地质出版社, 1990. 4~12.
- [14] 陈连勤. 塔里木河干流流域地下水开发利用及生态环境保护[J]. 新疆地质科技, 1992, 39(3): 28~31.
- [15] 陈家琦. 中国水资源[M]. 北京: 水利出版社, 1991. 1~41.

## ARID TREND AND ECO-ENVIRONMENTAL EFFECT OF WATER-SALT IMBALANCE IN NORTHWEST CHINA

Xu Hengli Zhou Aiguo Xiao Guoqiang Zhi Bingfa Ye Hanchun

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In terms of the arid trend in the Northwest China, this paper deals with the system dynamic pattern of water transfer and salt accumulation in this closed inland basin and elucidates the basic cause for the corresponding imbalance between the supergene salt accumulation and water-salt. In this context, the paper reveals the internal relations between the water-salt distribution and the soil eco-adaptability, presents the effect of the variation in the rhythm of water cycle on the spatial-temporal distribution of the soil eco-indices, and advances the great importance of the Great West Development by establishing the survival domains of various species and the soil eco-indices in the Northwest China. In addition, this paper discusses the construction of the reservoir project and the selection of the irrigation techniques in this inland basin.

**Key words:** climatic arid; water-salt imbalance; eco-environmental effect; eco-adaptability; soil eco-index.