

基于动力学模型的人口与淡水资源问题研究

陈玲玲, 林振山, 谢正磊

(南京师范大学地理科学学院, 南京 210097)

摘 要: 世界淡水资源正面临着空前的危机, 研究人口、经济和淡水资源的关系是世界面临的重大课题。从系统动力学出发, 建立了人口与淡水资源二元非线性动力模式, 并进行了平衡态分析, 研究结果表明: (1) 淡水资源承载力的提高将使淡水资源总量保持在较低水平上, 平衡态人口数量线性增加; 在保持淡水资源承载力不变的情况下, 将迫使人口总量非线性减少; (2) 无节制的灌溉面积扩张、工业盲目发展以及持续加速的水污染, 都将导致平衡态淡水资源和人口总量的减少, 并对全球淡水生态系统造成无法估量的影响; (3) 人口- 淡水资源系统的可持续发展, 必须建立在淡水资源自我更新与污水资源化比率之和大于水污染水平, 且人口增长率保持在低水平的基础之上。这要求人类严格控制人口增长、控制水污染, 对有限的水资源加强管理、合理配置、高效利用和有效保护。

关键词: 淡水资源; 人类活动; 承载力

中图分类号: S273; C92- 05

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2006)04-0237-03

Study of Human Activities and Freshwater Resources Based on the Dynamic Model

CHEN Ling-ling, LIN Zhen-shan, XIE Zheng-lei

(The College of Geographic Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

Abstract: The global freshwater resources is facing an unprecedented crisis now, the relationship among the population, economy and freshwater resources is one of the most important issues facing civilization in the 21st century. Based on the system dynamics, a nonlinear dynamic model of the evolvement between human activities and freshwater resources is established, the results show: (1) Increase in freshwater carrying capacity will make freshwater amount staying in a lower level and population amount in equilibrium linear increase. (2) Excess irrigated land area, uncontrolled industrial development and continuous accelerated water pollution, all of them, will make the freshwater resources and population amount in equilibrium decreased and exert fathomless influence on the global freshwater ecosystem. (3) The sustainable development of the system between population and freshwater resources must be established on the basis of the ability that the sum of rate of the water resources self-renovation and recycled polluted water larger than the degree of water pollution and that population growth rate staying in a lower level, all of which required that the population and water pollution must be controlled and the water management, the reasonable freshwater use must be strengthened effectively.

Key words: water resources; human activities; carrying capacity

1 引言

不断增长的人口及其对自然资源的消费正在极大的改变着地球, 地球的压力不堪重负。无节制的水资源消耗、污染和废物都是导致水环境问题的重要因素并且都与人口增长及人类活动有关。淡水资源是经济社会可持续发展至关重要的基础资源, 但在过去 50 年里淡水资源已经面临了世界性的巨大危机。

20 世纪后半页世界人口增长翻了一番, 从 1950 年的 25 亿到 2000 年的 61 亿, 这个史无前例的人口巨浪及不断上升的消费, 正把人类的索取推向超出地球的水资源极限, 全球从只有少数几个国家面临缺水问题到现在有 26 个国家共 3 亿人无法得到足够的淡水^[1]。联合国低调预测 2050 年世界人口将增加到 89 亿, 如果不采取任何行动, 依然以现在的用

水速度发展, 预计到时全世界将有 2/3 人口以不同形式面临水危机。无限制的人口增长是造成有限的淡水资源枯竭的最核心问题。

目前, 国内外关于人类活动与淡水资源可持续发展的研究很多。国外过去较侧重淡水资源的综合管理^[1, 2]等, 着重于分析水资源出现的危机与确立一系列机制以解决人口- 水资源- 经济发展的矛盾; 目前比较注重对不同地区进行具体实证研究, 如 Mohamed F. 对南地中海地区国家水资源战略和循环利用的研究^[3], 以及未来水资源开发的方法研究, 如海水脱盐、水资源市场化^[4, 5]等。国内则更多的关注中国未来水资源的安全问题^[6]以及我国水资源可持续发展的方法等。

尽管国内外都对人口- 淡水资源- 经济发展之间的关系及出路做出了很多研究和探讨, 但很少有研究涉及几者内在的动力学机制。随着非线性科学和数学的发展, 量化研究

* 收稿日期: 2005-09-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40371108); 国家“十五”“211”工程重大项目资助

作者简介: 陈玲玲(1982-), 女, 硕士生, 主要从事资源、生态研究; 通讯作者: 林振山(1955-), 男, 教授, 从事气候-环境-地理领域的研究。

已深入到地学、环境和资源科学。只有深刻了解要素之间的内在动力学关系和演化机制,才能更清楚的了解系统的演化方向,实施科学而有效的管理,从而达到最大限度地合理利用环境资源。本文试图通过建立一个简单的人口与淡水资源二元非线性动力模式,来研究人口与淡水资源之间的内在约束关系。

2 人口与淡水资源二元动力模式

在不考虑其他资源对人口的约束前提下,人口 x 的变化将与人口基数、净增长率 r 成正比,即:

$$\frac{dx}{dt} \propto rx$$

如果用 y 表示淡水资源总量, a 表示单位淡水资源所能承载的人口数量($a > 0$),即淡水资源对人口的承载能力, ay 则表示淡水资源能够承载的最大人口数。那么,人口 x 的变化将与淡水资源所能承载的剩余人口容量($ay - x$)成正比,即:

$$\frac{dx}{dt} \propto (ay - x)$$

由 Logistic 模式,我们可以得到以下有关受淡水资源约束下的人口动力模式:

$$\frac{dx}{dt} = rx(ay - x) = f(x, y) \tag{1}$$

Slobodan P. 认为水资源数量和质量主要受五个方面因素影响,即:人口、农业、不可再生资源、经济(主要为工业)以及持续的污染^[7]。其中有限的不可再生资源是工业发展所必需的,可是看作影响工业产量的因子。为此,我们假设人类活动对淡水资源 y 的影响主要是人口密度(数量) x 、农田总量 A 、工业 GDP 总量 E 。很显然,人口密度越大、工业及农业越发达,对淡水资源的消耗越大;联合国环境规划署在《Global environment outlook》中也表明在过去的一个世纪里,人口增长、工业发展及灌溉农业的扩张是引起水需求量增加的三个主要因素^[8]。此外,假设淡水资源自我更新能力(比率)为 R 、污水资源化比率为 K ,作者提出以下的淡水资源总量方程:

$$\frac{dy}{dt} = (R + K - cAE x - P)y = g(x, y) \tag{2}$$

方程组(1)~(2)即为人口与淡水资源演化发展的非线性动力模式。

3 平衡态和稳定性分析

由 $\begin{cases} f(x, y) = 0 \\ g(x, y) = 0 \end{cases}$ 求得系统(1)~(2)的定态解:

$$A(0, 0); B(\frac{R + K - P}{cAE}, \frac{R + K - P}{acAE}) \tag{3}$$

平衡态(定态)的稳定性将决定了系统的演化方向和趋势,以下将应用稳定性分析理论讨论平衡态的稳定性。

3.1 平衡态 $A(0, 0)$

平衡态 $A(0, 0)$ 的特征根方程的解为:

$$\omega = 0 \text{ 或 } \omega = R + K - P = \begin{cases} > 0, R + K > P \\ < 0, R + K < P \end{cases}$$

由稳定性分析理论可知:

当 $R + K > P$ 时,平衡态 A 是不稳定的结点,将向平衡态 B 转化;

当 $R + K < P$ 时,平衡态 A 临界稳定,即大量的淡水资源遭受人为污染,导致水资源环境不断恶化,直至枯竭,最终引发系统的崩溃。

3.2 平衡态 $B(\frac{R + K - P}{cAE}, \frac{R + K - P}{acAE})$

$$T^2 - 4\Delta = \frac{r(R + K - P)^2(r - 4cAE)}{(cAE)^2}$$

(1) 当 $r < 4cAE, R + K < P$ 时,平衡态 B 为不稳定的焦点,扰动随着时间增加而放大,不稳定的焦点将导致系统崩溃。这就是说,对淡水资源的人为污染比率不能大于淡水资源自我更新与污水资源化的比率之和,否则系统将愈加不稳定。Slobodan P. 认为水污染将是全球范围内是最重要的水问题^[7],为了淡水资源的可持续发展,人类必须控制水污染恶化的势头,通过各种方法和手段恢复被污染的水环境。

(2) 当 $r > 4cAE, R + K < P$ 时,平衡态 B 为不稳定的结点,系统将以非周期的运动远离平衡态。人类活动对水资源持续并日益加速的污染,积累在全球环境中,并且它们的释放与这些污染对生态系统破坏的最终爆发有一个时间差,即水资源系统功能的降低滞后与引起其降低的水体污染之间的时间差^[9],说明人类对水资源的污染必须严格控制在一个低水平线上,否则只会使人与自然的关系愈加紧张,最终导致整个生态系统的崩溃。

(3) 当 $r < 4cAE, R + K > P$ 时,平衡态 B 为稳定的焦点,扰动随着时间增加而减小,其动力学行为是变振幅的周期运动。当污水资源化比率与水体自我更新能力之和大于淡水资源污染比率,且人口增长率保持在较低水平时,淡水资源系统逐渐向平衡态 B 演化并保持稳定,这需要把水污染和人口增长都保持在一个低水平上才能实现人口-淡水资源系统的可持续发展,这个平衡态条件对现实具有重要的启示作用。

(4) 当 $r > 4cAE, R + K > P$ 时,平衡态 B 为稳定的结点,其动力学行为是非周期的曲线或直线运动,这种运动要比周期性的运动变化来的快。也就是说,当人口的自然增长率 $r > 4cAE$ 时,虽然此时结点是稳定的,但结点的运动远比焦点变化更快,人口-水资源系统的运动(变化)将加快。人类早已习惯于自然的缓慢变化,剧烈的变化,则意味着突变,对人类即是灾难。

4 讨论

从以上分析不难看出,平衡态 $B(\frac{R + K - P}{cAE}, \frac{R + K - P}{acAE})$ 对现实具有重要意义,为此,对平衡态 B 进行进一步讨论并研究其对现实的启示。

(1) 平衡态淡水资源总量与水资源自我更新能力(比率)、污水资源化比率成正比,与淡水资源承载力、受污染比率成反比(图 1)。

图 1a 表示随着水资源自我更新能力(比率)提高、污水资源化比率增加,淡水资源总量呈线性增加。说明在淡水资源日益紧缺的情况下,人类必须努力恢复被破坏的水体环境,增强水环境自我更新的能力;对公众强化水情教育,增强公众保护水资源的意识,合理利用和节约用水;通过建立节水型生产体系和污水资源化再利用等方法增加淡水资源的利用率。

图 1b 可以看出,当淡水资源的人口承载力较大时,淡水资源总量可以维持在较低水平线上,反之,则必须维持在一个较高的水平;同时表明水污染是制约水资源发展的重要因素。在 1999 年伊斯坦布尔联合国人类住区会议上,沃利.恩多指出污染是水浪费的重要原因之一;据世界卫生组织(WHO)调查结果,人类疾病 80% 与水有关,由于被污染的饮水或家庭环境恶劣引发的疾病每年至少造成 1 500 万人死亡。这些都向我们说明:必须建立先进的水资源管理体制和运用科技力量提高水资源承载力、正视水污染对人类的危害,否则人口-淡水资源系统的可持续发展只是一句空话。

(2) 平衡态淡水资源、人口总量均与农田总量、工业

GDP 总量成反比(图 2)。

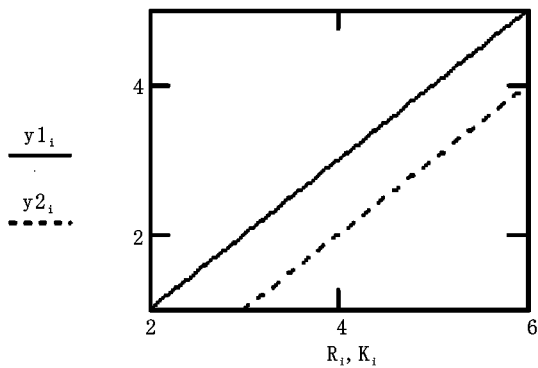


图 1a 淡水资源总量将随其自我更新能力
污水资源化比率提高而线性增加

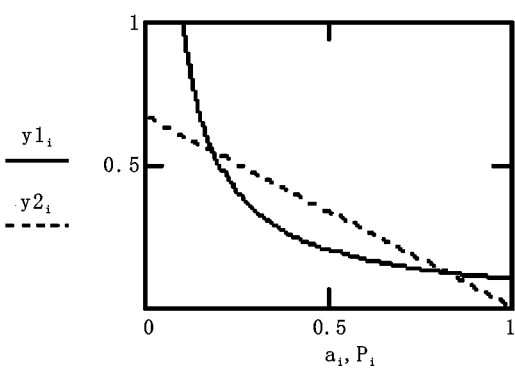


图 1b 淡水资源总量随其承载力提高而非
线性减少, 随污染增加呈线性减少

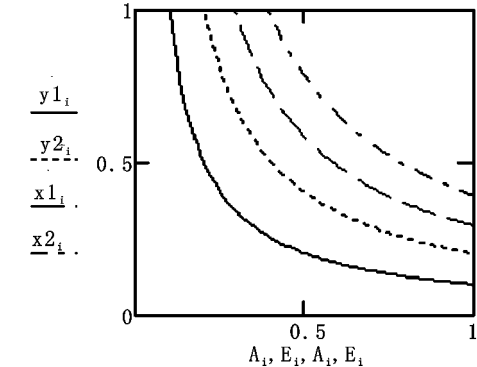


图 2 淡水资源总量、人口数量随农业和
工业水平的提高呈非线性减少

图 2 表示农业和工业越发达, 平衡态人口数量越少, 人口增长率越低, 这与欧洲国家的现状是完全相符的; 同时, 农业和工业越发达, 平衡态淡水资源总量呈非线性减少, 我国东部地区的情况与此一致。

从全球来看, 1970~ 2000 年这 30 年中人类的水提取量从 $2\,574\text{ km}^3/\text{a}$ 增加到 $3\,940\text{ km}^3/\text{a}$ ^[8], 反映了灌溉面积的大量增加; 世界经济迅猛发展, 导致需水量剧增, 无节制的水开发减少了沼泽和湿地, 改变了水流; 同时持续并日益增长的水污染对淡水生态系统产生了不可量化的影响。在许多河流和湖泊, 生态系统功能已经遭到破坏, 或已完全丧失。从理论到现实都说明灌溉农业和工业的无限制发展, 只会严重影响全球生态系统的健康发展。在大力提倡和促进水资源可持续发展的今天, 人类必须控制工业的盲目发展, 合理布局生产力, 严格控制污水排放; 限制灌溉面积的盲目扩张, 降低水耗, 提高水的重复利用率, 大力推广节水灌溉工程显得尤为重要。

同时, 我们从图 2 发现, 在灌溉面积扩张、工业迅速发展的初期, 淡水资源总量随着灌溉面积和工业发展而减少的速率远快于人口数量减少的速率, 这说明平衡态人口数量的减少具有时间的滞后性, 即自然环境对人类的惩罚具有滞后性, 当灌溉面积扩张和人类经济发展到一定程度之后, 平衡态人口总量将快速减少。

(3) 平衡态淡水资源与人口数量的关系

用 x_0, y_0 分别表示平衡态 B , 即:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{R+K-P}{cAE} = ay_0 \\ y_0 = \frac{R+K-P}{acAE} \end{cases} \quad (5)$$

由(5)式不难看出, 稳定的人口数量是淡水资源数量的

a 倍, 两者呈线性关系(图 3)。

从图 3 看出, 淡水资源承载力 a 提高时, 人口数量相应增加, 结合图 1b, 淡水资源的人口承载力较大时, 其总量可以维持在较低水平。两者同时说明只有合理布局生产力、调整产业结构, 优化配置水资源等, 努力提高水资源对人口的承载能力, 满足更多人的需水问题, 才能缓解人口剧增—水资源紧缺之间的矛盾, 这尤其适合于发展中国家。

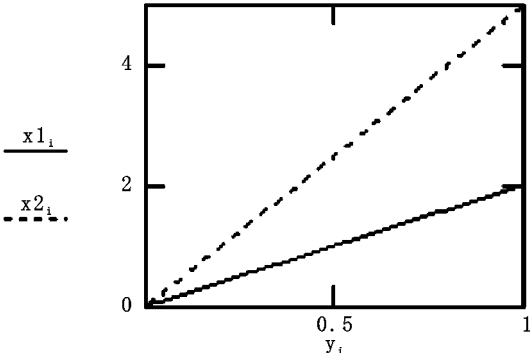


图 3 人口数量随淡水资源增加呈线性增长

与此同时, 当淡水资源的人口承载力 a 为一常数, 即水资源承载力在很长一段时间不变时, 若人口数量增加, 淡水资源消耗快速增加(图 4):

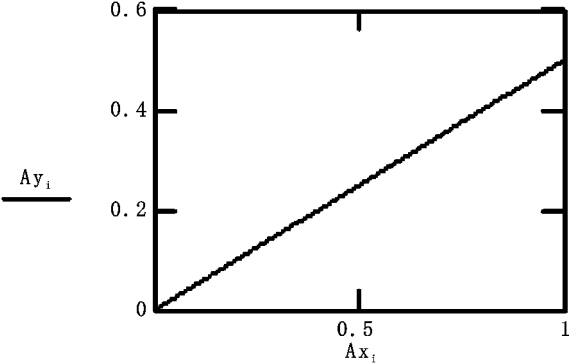


图 4 淡水资源消耗随人口净增长量上升而线性增加

图 4 表示当淡水资源承载力为常数时, 人口的增长将导致水资源消耗线性急剧增加, 这样的结果只会导致系统远离平衡态, 超过水资源承载能力的极限而崩溃。换言之, 淡水资源承载力一定时, 将迫使人口总量非线性减少, 以保证淡水资源总量平衡, 维持人口—淡水资源系统的稳定性。因此, 严格控制人口增长是关键。

(下转第 242 页)

2.4.1 种衣剂或保水剂的应用

直播是减少水土流失, 节省人力、物力、财力的造林有效措施之一。造林使用种衣剂拌种处理或保水剂拌土播种, 在雨季造林中可显著提高出苗率及成苗率。据王月海等人^[3]试验研究报道, 播种后, 在天气持续干旱 15 d 的情况下, 沂源试区应用保水剂的侧柏种子的成苗率比对照(不用保水剂, 下同)提高 2.6%~3.3%, 刺槐种子比对照提高 2.7%~3.2%, 紫穗槐比对照提高 1.0%。

2.4.2 覆膜、覆盖灌草栽植

对栽植的苗或处理过的种子(种衣)进行覆膜、覆盖灌草, 可以提高造林成活率。覆盖灌草的厚度以 10~15 cm 为宜。王月海等人^[3]的试验研究报道, 淄博博山区 8 月初播种的侧柏和刺槐, 在天气持续干旱 15 d 的情况下, 覆盖灌草与不覆盖灌草的成苗率分别提高 6.0% 和 25.9%。

2.4.3 容器苗造林

容器苗造林在我省已经推广应用多年, 实践证明, 这是切实可行的石灰岩山地荒山雨季造林技术, 对荒山植被的恢复起到了重要作用。据对侧柏容器苗与裸根苗造林对比实验表明^[4]: 容器苗造林比裸根苗造林可提高成活率 25%~40%, 苗高生长平均提高 10%~20%。山东省林科院研制的平衡根系无纺布容器育苗使容器育苗技术又上了一个新台阶。所用的容器袋为可降解纤维材料, 对环境无污染。无参考文献:

[1] 孙松龄, 等. 威海市封山育林 20 年的效益分析[J]. 山东林业科技, 2001, (3): 31–33.
[2] 王月海, 等. 山东省石灰岩山地植被资源结构特点的初步研究[J]. 山东林业科技, 2004, (3): 21–23.
[3] 王月海, 等. 石灰岩山地保水播种造林技术研究初报[J]. 山东林业科技, 2003, (5): 24–25.
[4] 房用, 等. 山东省灌藤植物资源及荒山造林技术[J]. 水土保持研究, 2003, 10(5): 101–103.

(上接第 239 页)

5 结 论

根据稳定性理论, 我们推导出平衡态 $B(\frac{R+K-P}{cAE}, \frac{R+K-P}{acAE})$, 通过以上讨论我们发现: (1) 淡水资源承载力的提高将使淡水资源总量保持在较低水平上, 平衡态人口数量线性增加。因此必须优化配置淡水资源, 利用先进的管理技术和科技力量提高淡水资源对人口的承载能力。

(2) 无节制的农田面积扩张、工业盲目发展以及持续加速的水污染, 都将导致平衡态淡水资源及人口总量非线性减少, 对全参考文献:

[1] Mahmoud A Abu- Zeid. Water and sustainable development: the vision for world water, life and the environment[J]. Water Policy, 1998, 1(1): 9–19.
[2] Adil Al Radif. Integrated water resources management(IWRM): an approach to face the challenges of the next century and to avert future crises[J]. Desalination, 1999, 124(1–3): 145–153.
[3] Mohamed F Hamoda. Water strategies and potential of water reuse in the south Mediterranean countries[J]. Desalination 2004, 165: 31–41.
[4] Mohamed F. Hamoda. Desalination and water resource management in Kuwait[J]. Desalination 2001, 138(1–3): 385–393.
[5] Slim Zekri, William Easter. Estimating the potential gains from water markets: a case study from Tunisia[J]. Agricultural Water Management, 2005, 72(3): 161–175.
[6] 姜文来. 中国 21 世纪水资源安全对策研究[J]. 水科学进展, 2001, 12(1): 66–71.
[7] Slobodan P Simonovic. World water dynamics: global modeling of water resources[J]. Journal of Environmental Management, 2002, 66(3): 249–267.
[8] The UNEP GEO team. UNEP Global Environment Outlook 2000[R]. United Nations Environment Programme, 1999.
[9] 郑华, 欧阳志云, 赵同谦, 等. 人类活动对生态系统服务功能的影响[J]. 自然资源学报, 2003, 18(1): 118–126.

缓苗期、移栽成活率近 100%。平均基质重量轻, 容易运输。运输过程不散团, 长途运输保水性好。据我们 2004 年 8 月在济南历城区、淄博沂源县和淄博博山区等 3 地的对比试验, 应用无纺布容器育苗的苗木造林成活率达 98%, 而普通容器育苗造林的成活率仅为 75%, 提高 23%。造林 1 年后的 2005 年 9 月, 对上述 3 地调查, 应用无纺布容器育苗造林的保存率平均达 94%, 而普通容器育苗造林的保存率仅为 59.5%, 提高 35.5%, 苗高生长平均提高 27%。重点推广应用平衡根系无纺布容器育苗技术, 这是解决我省荒山造林难、造林速度慢等技术瓶颈的重要措施, 是提高我省造林绿化上档次上水平的关键技术。

3 建议与讨论

对石灰岩山地的植被恢复, 笔者以为, 在认识石灰岩山地资源的基础上首先应该保护, 在保护的前提下开发利用。一个行之有效的途径就是上个世纪 50 年代就推广的封山育林经验。从林业角度来说, 要先封后造, 封造并举; 先草后灌、乔、乔、灌、草结合, 这才是石灰岩山地植被恢复的正确途径。石灰岩山地的植被恢复关键是选择合理有效的途径, 积极造林绿化, 但也要突破传统林业以乔木树种为营造对象的束缚, 对瘠薄山地(主要为荒山裸岩)营造适应性比较强的灌、藤、草, 是对造林树种的有益补充和最佳选择, 这应引起足够的重视。