

Research Theory and Practice in Hydrology and Water Resources

水文水资源研究

理论与实践

——刘昌明文选

by Changming Liu



 科学出版社
www.sciencep.com

水文水资源研究理论与实践

——刘昌明文选

Research Theory and Practice in Hydrology and Water Resources

by Changming Liu

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书纳入了我国著名水文水资源学家刘昌明院士不同时期、不同领域的论著 75 篇。全书共分四部分:第一部分为水文水循环与水文计算;第二部分为水与生态环境;第三部分为水资源研究;第四部分为国外发表论文选。内容涉及水文水资源研究的理论、方法和应用实践。既有荣获国家重大成果奖的相关论述,也有创新意义的“四水转化”、“五水转化”等篇章,更有为华北平原乃至全国节水农业奠定理论基础的系统论著,以及为寻找中国水问题出路、参与“南水北调”重大决策研究和缓解黄河断流对策的广泛内容,等等。是一部闪烁着广阔学术思想、内容丰富多彩的珍贵文献。

本文选可供广大水文水资源、生态环境和农林牧等方面的科技人员和高校相关专业师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

水文水资源研究理论与实践:刘昌明文选/刘昌明著. —北京:科学出版社, 2004

ISBN 7-03-013250-5

I. 水… II. 刘… III. ①水文学-文集②水资源-文集 IV. ①P33-53
②TV211.1-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 029770 号

责任编辑:吴三保等/责任校对:钟 洋

责任印制:钱玉芬 /封面设计:黄华斌

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004 年 4 月第 一 版 开本:787 × 1092 1/16

2004 年 4 月第一次印刷 印张:45 1/4

印数:1—1 500 字数:1 000 000

定价:100.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈明辉〉)



刘昌明院士近照

(于静洁摄，2004年4月中旬呼和浩特)

作者简介

刘昌明，男，1934年5月出生于湖南长沙，1956年西北大学毕业。1960年留苏，在莫斯科大学水文教研室与实验室研究生进修。1981~1982年赴美国做访问学者。1964~1986年先后为中国科学院地理研究所副主任、主任、副研究员，1984年荣获首批国家级“有突出贡献的中青年专家称号”，1986年聘为研究员，1990年批准为博士生导师。1990年获国务院政府特殊津贴。1995年增选为中国科学院院士。

作者是水文水资源研究领域具有广泛影响的学术带头人之一，颇享国内外知名度，出任多个国际与国内重要学术组织的要职。如曾任北京师范大学资源环境学院院长，中国科学院石家庄农业现代化研究所所长，中国地理学会水文专业委员会主任，国际雨水集流协会（IRCSA）副主席。现任英国 *Hydrological Processes* (SCI)，美国 *Water International* (SCI)，*Water Resource Development* (EI) 杂志国际编委等；北京师范大学地学、资源与环境学部主任，北京师范大学环境学院水科学研究所所长，中国科学院水问题联合研究中心主任，国际地理联合会（IGU）副主席，中国地理学会（GSC）副理事长，中国环境科学学会副理事长，IGBP/BAHC中国国家工作委员会主席，联合国国际水文计划（IHP）中国国家委员会副主席，《地理学报》和《中国生态农业学报》主编等。

作者曾主持完成国家自然科学基金重大项目、中国科学院重大项目、中国科学院国家咨询项目、中国工程院国家重大咨询项目等多项国家、省部级科研课题，已培养水文水资源人才（硕士、博士、博士后）67人。其研究成果获全国科学大会“重大成果”奖1项；国家级奖3项，省部级级奖8项。迄今共发表论文和出版专著360余篇（本），其中包括国外发表的80篇论文和参与主编国内外书刊30多本在内。目前任国家“973”“黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理（G19990436）”项目首席科学家，河北省重大项目“河北平原典型区农业节水与地下水可持续利用”负责人。

前 言

刘昌明院士是我国著名的水文水资源学家。刘先生 20 世纪 60 年代初从原苏联留学回国,创建了我国最早的室内降雨径流实验室,并开展野外小流域径流试验。先生重视实验,从原始第一手资料进行科研创新的观点对我国基础水文学的理论发展影响深远。在 60 年代初期,先生的足迹就从沟壑纵横的黄土丘陵到浩瀚的大戈壁,从青海湖滨到地球之巅的风雪高原,提出了既有物理机制又简单实用的著名小流域暴雨洪峰流量计算公式,荣获 1978 年国家重大成果奖,为我国无资料流域的水文预报研究,为西北青藏铁路等 8 条铁路新线的建设做出了巨大的贡献。80 年代先生在大气水、地表水、地下水的水文循环模式中,发展了土壤蓄水库的内涵,强调土壤水为水文循环的重要环节,深入研究“四水转化”的理论以及这之后提出的包括植被在内的“五水转化”。90 年代,先生提出水文循环应该同时向微观和宏观方向发展。先生以河北栾城实验站为基地做了大量深入仔细的土壤-作物-大气水分运移研究,并提出了水分传输的界面过程,为华北平原的节水农业奠定了系统的理论和应用基础。在世纪之交,先生参与并组织了“中国水问题出路和缓解黄河断流对策”的国家级咨询调研。为适应国家的重大需求,参与国家重大项目“南水北调”的决策研究,致力于国家重点基础研究规划项目“黄河流域水资源演化规律及可再生性维持机理”(973)研究,担任项目首席科学家。他领导下的“黄河流域水循环的模拟”已成为我国分布式水文模型发展的重要开拓方面。

先生一口流利的英语和其卓越的学术成就,在国际上享有崇高的威望。作为水文水资源领域的著名专家,先生先后身兼国际地理联合会(IGU)副主席、IGU 区域水文对气候变化的响应专业委员会主席、国际地圈生物圈(IGBP)水文循环的生物圈方面(BAHC)国际科学指导委员会委员与中国国家委员会主席和第 7 届国际雨水收集协会副主席等职务,多次应邀到国际著名学术会议做主题报告,并多次主办国际学术会议。同时,还担任国内外(包括 SCI, EI 和核心刊物)多个杂志的编委与主编。

先生在水文水资源学方面的卓越建树令我们有幸成为先生的弟子而自豪。我们特别珍惜每一次与老师见面的机会,因为在短至几分钟长达几小时的学术指导中,我们能得到令我们终生难忘的教诲。

在 2004 年 5 月 15 日先生 70 华诞到来之际,我们荟萃了先生大部分主写论文和小部分与弟子合作的论文,编辑成了《水文水资源研究理论与实践——刘昌明文选》。文选中的论文有的年代久远,有的是新近刚刚发表,但都是先生兢兢业业致力于水文水资源学研究的见证。本文选将为弟子们系统地学习老师学术著作提供便利条件。

本文选的出版也旨在弘扬老师的学术思想,扩大我国水文学研究的社会影响和学术交流,丰富我国水文文献的宝藏。本文选所表达的先生从室内实验到田间试验、从战略研究到理论分析的敬业精神,将激励更多的有志之士投身于水文科学研究之中。由于先生从事的研究涉猎了水文水资源学的广泛领域,因此本文选在一定意义上也是一本很好的教科参考书。

刘先生著作等身,迄今已发表论文和出版专著 360 余篇(本),限于篇幅,这里仅遴选了其不同时期、不同领域的论文 75 篇。同时,为了节约版面,所选论文亦没有保留摘要部分。在本文选出版的自始至终,得到刘先生全部弟子的大力支持与资助,以及吴三保先生认真细致的编校,在此一并表示感谢!

文选编辑小组
于静洁、刘苏峡、李丽娟等
2004 年 3 月 22 日

目 录

前 言

第一部分 水文循环与水文计算

自然地理界面过程及水文界面分析	1
水量转换的若干问题	10
关于径流形成的实验室研究方法	22
黄土高原暴雨径流预报关系初步实验研究	33
黄土坡耕地水土流失计算方法的探讨	38
洪峰流量的形成与计算公式	54
洪峰流量计算的简化方法	83
设计洪水过程线的计算	104
森林拦蓄降雨极限容量模型	110
土壤-植物-大气系统水分运行的界面过程研究	116
土壤-植物-大气连续体模型中的蒸散发计算	123
土壤水零通量面及其变化规律	132
直管式负压计及其应用	143
大型蒸渗仪与小型棵间蒸发器结合测定冬小麦蒸散的研究	146
不同长度 micro-lysimeters 对测定土壤蒸发的影响	151
农田生态系统 CO ₂ 通量的转换计算	156
作物光合、蒸腾与水分高效利用的试验研究	162
基于 DEM 的分布式水文模型构建方法	170
栅格 DEM 的水平分辨率对流域特征的影响分析	180
基于 DEM 的分布式水文模型在大尺度流域应用研究	189

第二部分 水与生态环境

黄土高原森林对年径流影响的初步分析	197
关于生态需水量的概念和重要性	212
中国 21 世纪水供需分析:生态水利研究	218
河道最小环境需水量确定方法及其应用研究(1)——理论	223
南水北调用水区水量平衡变化的几点分析	227
南水北调地区的水量平衡	234
南水北调工程对生态环境的影响	248

发挥南水北调的生态效益,修复华北平原地下水	255
南水北调中线工程不同调水规模对汉江中下游影响分析	259
西北地区生态环境建设区域配置及生态环境需水量研究	267
黄河干流下游断流的径流序列分析	273
黄河流域水循环要素变化趋势分析	281
黄河上中游天然径流多时间尺度变化及动因分析	288
近 20 年来黄河流域植被覆盖变化分析	295
降雨的空间不均性对模拟产流量和产沙量不确定的影响	301
基于 SWAT 模型的基流估算及评价——以洛河流域为例	308
华北平原地下水动态及其对不同开采量响应的计算——以河北省栾城县为例	316
全球变暖对区域水资源影响的计算分析——以海南岛万泉河为例	326
可持续发展水利的生态学分析	338
地理系统中的水研究	345

第三部分 水资源研究

华北平原农业节水与水量调控	353
节水优先 需水控制 开源节流统一观	361
节水的潜力与解决缺水的途径	365
海河平原农业供水的决策分析模型	369
水资源调配的重大战略对策	380
南水北调东线水量平衡的地理系统分析——以东线一期工程为例	398
南水北调:重组中国命脉资源	410
水资源调配中 PRED 综合论证的初步研究	417
我国水资源可持续开发中的雨水利用	425
土壤水的资源评价	432
低洼地区土壤水分动态与作物渍涝分析	447
21 世纪中国水资源若干问题的讨论	462
我国 21 世纪上半叶水资源需求分析	472
我国西部大开发中有关水资源的若干问题	477
解决我国水问题的途径	482
区域水资源开发利用的阈限分析	489
南水北调东中两线不同水文区降水丰枯遭遇性分析	496
黄河上游南水北调西线工程可调水量及风险分析	504
水利现代化的内涵及评价指标体系的建立	512
黄河水资源量可再生性问题及量化研究	517
中国国际河流可持续发展研究	527

第四部分 国外发表论文选

The Estimation of Small - Watershed Peak Flows in China	536
中國における地理水文學の発展と現状——水収支の研究を中心に	547
A Method to Assess the Effects of Clmatic Warming on the Water Balance of Mountainous Regions	551
Determination of Daily Evaporation and Evapotranspiration of Winter Wheat and Maize by Large Scale Weighing Lysimeter and Micro - Lysimeter	563
Problems in Management of the Yellow River	577
Some Problems of Flooding and Its Prevention in the Lower Yellow River	588
Conjunctive Use of Agricultural Water in the Lower Reaches of the Yellow River	603
黄河下流における斷流と塩類化の問題	613
Environmental Issues and the South - North Water Transfer Scheme	620
China's South - to - North Water Transfer Schemes and Key Issues	632
Drying Up of the Yellow River: Its Impacts and Counter - Measures	651
Measurement of Evapotranspiration in a Winter Wheat Field	662
Measurement and Analysis of Evapotranspiration and Surface Conductance of Wheat Canopy	677
Deliberation on Scale Theory	694
附录:刘昌明著作目录	701

第一部分 水文循环与水文计算

自然地理界面过程及水文界面分析

一、引言

早在 20 世纪 50 年代后期,黄秉维先生提出:“水文学的研究应当发展坡面径流过程的研究”,是他倡导研究现代自然地理过程的一个例子。60 年代黄秉维先生对地理学的研究方法精辟地概括为:在分析问题的基础上进行综合和在综合的指导下进行分析。笔者按照黄先生的远见卓识来探讨自然地理过程的分析与综合研究。

动态性是地理系统最重要的特性之一。在一定意义上讲,地理学的主要任务是研究地理环境的形成与演变规律。与地理过程研究有关的术语是人们所熟知的,如地形发育,气候变迁,径流形成,土壤发生或形成,植物群落的演替等。又如带有循环特征的术语如侵蚀循环、大气环流、水文循环、元素迁移转化、生物小循环等。再如沙漠化、草场退化、城市化等带有变化名称的术语,在地理学屡见不鲜,不胜枚举,所有这些都带有明确的地理过程涵义。

地理过程的研究可以划分为不同时段(态):现在的、过去的与未来的。这三者之间的关系与研究意义在于:①现在过程的研究是认识过去的钥匙;②地质时期和历史时期的地理过程研究,有助于对现代过程形成的认识。③现在与过去地理过程的研究则是预测未来的根据。纵观 46 亿年地球演化过程可以发现,地球由初始混沌时期,经历了由气圈、水圈、生物圈(约 30 亿年)、人类圈(约百万年)到现在的智能圈的进化顺序,至今形成了地球表层的五元结构。

随着人口的增长与人类智能的发展,未来各圈层间的结构将会因此而进一步演化,人

* 本文原载《自然地理综合研究——黄秉维学术思想探讨》,北京:气象出版社,1993 年。文章页码见本书附录(余同)。

类生态圈必将发展成为渗透各个圈层的主导圈层。由于人类活动的空间拓广,而且随时间不断延伸,人、地关系的重要性必将与日俱增,这就是认识过去现在未来地理过程的理论意义之所在。可以预言,现在单纯的自然地理过程在未来将逐渐被包括人类活动在内的综合地理过程所取代。也许会把现在我们探讨的现代地理过程改名为人类生态过程的研究。

地理系统包括它的各个子系统都属于开放系统,它们之间存在着物质与能量的交换,包括信息的传输。这些过程必然首先在系统的界面上展现出来。因此,界面上的过程是至关重要的。其研究的意义主要有两点:一是它有助于确定系统的输入与输出,从而为人们提供地理过程控制或调控的依据;二是有助于研究系统间的接口,从而为系统的耦合与综合研究提供途径。因此,着重界面过程的研究有助于发展地理学的分析与综合方法。

二、自然地理过程的研究与发展

自然地理过程因部门学科的研究而有各自然地理要素过程理论的发展。在新中国成立以来,尤其是 20 世纪 50 年代末期以后的自然地理要素定位与半定位实验站的先后建立,积累了丰富的自然地理过程观测资料,其中包括冰川、冻土、沙漠、黄土高原水土流失、湖泊、沼泽、山地泥石流,华北平原水热平衡,农业生态等一系列台站,广泛代表着我国不同自然单元区。所有这些测站都积累了大量内容丰富的自然地理过程观测资料,不仅为理论研究提供了数据,而且在生产应用上分别为自然资源评价利用,环境保护,生态平衡、土地利用与农业发展等服务。自然地理过程的实验还包括室内模拟实验室的研究,如风洞、低温、流水地貌、人工模拟降雨径流——坡地水沙运动的比尺模拟,定时定点的水、土取样室内理化分析等。利用气象、水文与历史文献记载研究历史时期的自然地理要素变化以及根据地质年代古地理方法研究地理环境的演变过程具有很长的科学积累。虽然我国在这领域的研究取得明显的进展,但多限于局地或中小尺度的研究与单一自然地理过程的研究。

当前国外的研究动向,主要是向全球宏观尺度的发展。近 20 年来,一系列的全球性研究计划相继提出,如世界气候计划、环球大气圈计划,国际地球物理年,国际水文十年与国际水文计划,国际生态计划,国际岩圈计划,人与生物圈计划,国际地圈与生物圈计划,国际减灾十年等,所有这些国际性计划都与地理学的各部门的地理过程研究有一定的关系,尤其国际地圈与生物圈计划,广泛涉及地理过程的问题。通过全球宏观尺度的研究,将会更加丰富自然地理过程的内容,同时在各种计划的交叉和联系上,还将促进自然地理过程向综合的方向发展。

自然地理过程的研究发展趋势可归纳以下几点:

- (a) 由地质年代与历史时期地理过程的传统研究向机制的研究发展;
- (b) 由定性的鉴别向定量实验发展;
- (c) 由单个过程研究向过程的综合分析发展;
- (d) 由中小尺度的局地地理过程向大尺度或宏观尺度的全球地理环境过程研究发展。
- (e) 由自然地理过程学科研究向密切结合人类活动作用的方向发展;

(f) 由单纯认识自然地理过程的研究向对未来的预测和预报发展。

综上,自然地理过程的研究将会在宏、微尺度上不断纵深而综合的发展,自然地理过程中最为活跃的一个方面——水循环的研究可以反映这一发展。

地理过程的研究应为时代向地理科学提出的任务——人类面临的人口、资源、环境与生态等有关重大问题的研究服务,地理科学在这些重大任务中可以发挥作用的潜在优势在于它的区域性综合性。但是,地理科学还存在着不能完全适应这种形势需要的弱点:①缺乏深入的理论分析;②不能进行有效综合;③研究方法——手段有待革新。因此,必须对以上问题进行分析,提出战略对策。

地理系统中的界面过程应当成为地理过程研究的核心或关键。其主要理由有三:①研究界面过程能有效地研究开放系统间的物质、能量与信息的交换,从而促进地理科学向理论方面深入;②界面过程的研究实际上是系统间接口(interface)的研究,是各地理子系统间进行组装不可缺少的接合部件,从而能发展地理科学综合方法;③界面过程的研究必然导致跨学科、跨部门相互渗透,有利于引进相邻学科成就,包括理论成果与技术手段。基于以上三点分析,可以明显地看到在自然地理过程的研究中,开展界面过程这一新领域的研究具有前沿性与战略性。

三、界面过程的分析

1. 自然地理过程的主要方面

(1) 单一过程

包括自然地理单一要素的研究与学科门类的研究,这方面已有相当的工作基础,但有待深化。

(2) 复合过程

这方面的研究带有综合性,难度较大,研究比较薄弱,是今后需要重点发展的方面。

(3) 6种重要作用

在含有多要素自然综合体的形成与变化过程中,以下六种作用占有重要地位:

- (a) 辐射条件与大气环流的相互作用(气候);
- (b) 地貌内、外营力相互作用(地貌);
- (c) 降水、径流、蒸发相互作用(水文);
- (d) 理化与生物过程的相互作用(生地);
- (e) 生物体适应过程与生产过程相互作用(生态);
- (f) 社会经济与自然相互作用(人类活动)。

(4) 3种变化的结合性质

在地理过程中,有三种变化的结合性质,即:

- (a) 时间(日、月、年)上的韵律或节律;
- (b) 自然过程含有人类活动的影响,如人类活动对非生物要素变化周期律的影响;
- (c) 由渐变到突变的进展性变化,包括灾变在内。

2. 自然地理的界面的性质

(a) 系统集成之交,交即界面的简单定义。可以分为两大类,即学科内部与学科间的交。

(b) 二维界面,是实际存在于两个系统之间的界面,表面的形式可以是平面,但更多的是曲面,如大气下垫面、坡面、水面、冰面、河床与海洋底面,植物冠层表面等等二维界面。这些表面的形态与性质在很大程度上决定着界面上发生的过程。

(c) 多维界面,往往是一个界层或中间体,如雨水与地下水的联系,往往要通过土壤层,土壤层上接大气底层下联地下水层。可见,多维界面通常是六面体,物质能量与信息的流动可以是四面八方的,情况十分复杂。还应指出的是界面可有任意几何尺度,既可以是水平或近水平的,也可以是垂直与近垂直的。

(d) 界面过程的时维。由研究的命题决定时维的必要性,地理过程实际上是研究地理现象或要素的随时间的演变。

按时间的尺度,可以把自然地理过程划分为四种:

- (a) 超长期的,如地质年代或地质时期的古地理过程,常以千万年为单位;
- (b) 长期的,一般指年际间的变化过程,在地理学中常以离(变)差系数来表示,即用系列的均方差与平均值的比来定量,在气候要素的变化过程中,常用矩平表示等;
- (c) 中期的,常指多季和数年时期的过程;
- (d) 短期的,包括日变化与日内以时、分为时间单位的过程,包括突变,如风暴、地震、山洪等。

3. 界面过程的空间尺度

在地理过程的研究中,如地貌中模拟模型与水文气候中的水汽输送等许多研究采用的线性尺度(L),它是空间面积(A)的平方根($L = \sqrt{A}$)。而在垂直方向上,高差(h)则是由高程(H)与基点高(H_0)来定义的。由空间大小来划分界面过程按通常的概念有宏观、中观与微观等几种尺度。不同空间尺度的界面过程对要素变化的响应是不同的。微观尺度的响应最为敏捷。因此,微观尺度在研究界面过程的机制方面具有重要性。

4. 时间与空间的关系

时空组合按以上的尺度划分至少有 12 种。具体的组合取决于研究的对象与要求。时空之间的关系在地理过程中已开始引用各态遍历理论,即以空间的变化估计时间变化。另外,时间过程与空间尺度存在着一定的关系,例如大气水分循环系数(K)与空间尺度存在 $K = f(L)$ 的关系。

5. 空间尺度与维数的关系

大尺度的研究采用的维数一般多于中小尺度;界面过程研究的复杂性与难度常随采用的维数的增加而增加。由中、小尺度的成果推广到大尺度上的应用所遇到困难的原因之一,很可能与维数不相应有关。

四、系统耦合

界面过程是系统耦合研究的重要内容,由于地理学的多要素、多部门、多层次研究的特点,系统耦合的内容是十分广泛的。

1. 简单耦合(指两系统间耦合)

(1) 自然地理的外部耦合

如资源(R)、环境(E)、生态(E_c)与社会经济(S_e)等。假定它们相对独立,自成系统的情况下,可能成为研究命题的界面过程,可以用一矩阵表来设计(表1)。

表1 自然地理学与其他学科的结合

X	G	R	E	E_c	S_e
G	1	G/R	G/E	G/E_c	G/S_e
R		1	R/E	R/E_c	R/S_e
E			1	E/E_c	E/S_e
E_c				1	E_c/S_e
S_e					1

(2) 各自然地理要素间的耦合

如果取主要自然地理要素如气候、地貌、水文、土壤、生物地理与化学地理,如果认为它们是相对独立的系统,并分别用符号 Ci 、 Ge 、 Hy 、 So 、 Bi 、 Ch 代表它们,类似前节,也可用一矩阵表示设计(表2)。

表2 地理学内部耦合(自然地理要素间的耦合)

X	Ci	Ge	Hy	So	Bi	Ch
Ci	1	Ci/Ge	Ci/Hy	Ci/So	Ci/Bi	Ci/Ch
Ge		1	Ge/Hy	Ge/So	Ge/Bi	Ge/Ch
Hy			1	Hy/So	Hy/Bi	Hy/Ch
So				1	So/Bi	So/Ch
Bi					1	Bi/Ch
Ch						1

以上演绎展示了以下几点:①两要素之间的符号(表1、2中的斜线“/”)表示可以存在的界面过程;②按集合原理,要素间服从于交换律。如 C/Ge 与 Ge/Ci ,可以分别表示为气

候地貌和地形气候两种意义不同的研究;③界面过程的可能命题是可以推测的。如果采取的系统或要素为 i , 进行耦合 ($i=2$) 推知可能成为界面过程研究课题的数量(表 3)。

表 3 两独立系统间界面过程的可能命题数

i 系统个数	2	3	4	5	6	7	8...
j 耦合($j=2$)	1	3	6	10	15	21	28...

2. 多系统耦合

多系统耦合是指 3 个以上地理要素耦合的多界面研究过程。近年来这种研究在自然地理过程研究中已经出现。如 20 世纪 60 年代中期以来,特别是近年来国内外正在开展研究的土壤-植物-大气连续系统(soil-plant-atmosphere-continuum, 即 SPAC), 发展了多界面复杂过程研究, 如土壤与根系, 根茎叶的水分营养传输, 叶面气孔到大气层水, 热过程的研究等等, 国际地圈生物圈计划(IGBP)的若干研究设计也都开始涉及这一多界面复杂过程。

对于 3 个以系统/要素的复杂耦合的可能命题将比前述简单耦合更加广泛。由演绎推知的界面数如表 4 所示。

表 4 反映多个相互独立系统耦合一起的极端复杂性和它们之间相互作用的多回路与多反馈性质。因此, 包括多种因素的地理系统是一个巨系统, 这个巨系统的研究必然是综合性的和具有高难度。

表 4 多种系统间界面过程的可能命题数

j i	3	4	5	6	7	8...
4	4	1				
5	10	5	1			
6	20	15	6	1		
7	35	35	21	7	1	
8	56	70	28	8	8	1
...						

五、水文界面过程的分析

水文系统是自然地理系统中的子系统, 虽然其规模小于地理系统, 但就其内部来看, 也是一个多层次多界面的复杂系统。它不仅向其他地理子系统开放, 发生物质与能量的交换, 而且其自身也在不断转化, 有一系列的过程, 包括相/态等理、化性质的变化。

1. 水量转化的分析

水量转化是水在地球上循环的具体表现, 由水汽到降水, 由降水转变为地表水, 土壤(非饱和带)水与地下(饱和带)水, 由土壤水经过植物吸收变为植物水分并在蒸腾作用下转变为大气中水。在这种复杂的过程中, 在能量的作用下水分相/态变化频繁。因此, 水

量转化可定义为水文状态的变化(transformation of hydrological states)。近年来,这个问题引起了国内水文研究的广泛注意,相继提出了“三水转化”,“四水转化”,及“五水转化”的概念。在西方国家多见地表水与地下水关系(interaction between surface water and groundwater)的提法。地表水与地下水转化关系及“三水转化”的研究涉及重力水资源定量计算,它是工、农、城市供水工程规划与设计的基本依据;“四水转化”与“五水转化”的研究特别涉及农业灌溉与农业水资源的联合利用及农田水分的调控,是农业供水的重要根据。在国际地圈生物圈计划(IGBP)中,“五水转化”则更与其核心课题(core project)“水文循环”的生物圈方面(biological aspects of hydrological cycle)相互呼应。

从大气到地表,从地表到地下,不同层次中的水分的交换运动,必然要通过一系列的系统界面和发生水在界面上流通过程。这些过程将作为现代水文学的基础研究。

2. 水分运动的界面过程

水分由一个状态转变到另一个状态的转化,实际是水从一个系统(空间)到另一个系统(空间)的运动。系统间界面上或界体中的水分流通过程可视为水文过程。如以“五水”系统为例,即以大气水(P),地表水(R),土壤水(S),地下水(G)及植物水(V)为相互独立系统,研究它们之间耦合,则可以得出如下图所示的相互作用关系。

由图 1 可见:

(a) 处于各状态下的水分之间存在着一系列转化关系,五种状态的水分构成一个互相联系的网络;

(b) 各种状态的水分可有直接或者间接的交换,其数量可以按照质量守恒的定律来计算;

(c) 各种状态下的水分转化流动的通路是多种途径的,并且均能构成闭合回路;

(d) 5 种水分的耦合,有 10 种方式,如图 1 中阿拉伯数字所示,这种耦合存在着界面和界体,如 $P-S$ 的界面是地表面;图 1 所示的水文界面过程按阿拉伯数字可以写出它们过程内容如下:①降水的植物截留过程/截留蒸发过程;②穿透降水过程/植物蒸腾过程;③土壤水分的渗流过程/土壤毛管水分的上升过程;④多孔介质中渗漏过程/地下径流过程;⑤降水径流过程/地表与水面蒸发过程;⑥土壤入渗过程/土壤蒸发过程;⑦根系层吸水过程/潜水上蒸蒸发过程;⑧土壤径流与表层流过程/地下水渗漏过程;⑨潜水的降水补给过程/潜水排泄过程;⑩植物对地表面径流影响过程/地表水的利用过程。

以上 10 种过程具双向运动性质,而且是性质不同的过程。

(e) 两个以上系统耦合的水文过程是一个串联的过程,其界面过程是有序的或分层次的,其界面数由所耦合的系统个数来决定。如果取前述的 5 种水分状态(P, R, S, G, V)进行分析,按所取系统的个数(j)划分耦合方式:

$j=2$, 共有 10 种

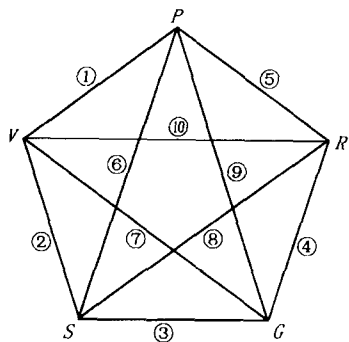


图 1 大气、地表、土壤、地下岩层和植物中的水分关系