

从自然控制论看黄河上游人工增雨^{*}

雷恒池¹⁾ 曾庆存¹⁾ 李仑格²⁾ 朱江¹⁾

1)(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029) 2)(青海省气象局人工影响天气办公室, 西宁 810001)

摘 要 用自然控制论原理和方法, 从理论上探讨了用人工增雨来解决黄河断流所遇到的一些问题及解决方案。结果表明, 只有在黄河上游地区增加降水才可以缓解黄河断流问题, 河曲地区是最佳人工增雨区。针对河曲有限区域人工调控天气问题, 首次提出了解决人工增雨的正问题与反问题的概念。在此基础上, 给出了河曲地区人工增雨的概念模型。

关键词: 自然控制论; 黄河; 人工增雨

1 引言

黄河是中华民族的母亲河, 她孕育了中华民族几千年的文明史。自新中国成立后, 党和政府花费了大量的人力、物力在黄河上游修建了多座水库, 为根治黄河水灾做出了举世瞩目的成绩^[1]。然而, 进入 20 世纪 80 年代以来, 由于全球气候变化的影响, 黄河断流问题日益严重, 成为制约黄河流域工农业生产发展的一个严重因子^[2]。青海省人工影响天气办公室自 1997 年首次开展青海黄河上游人工增雨工作以来, 连续几年的工作, 为增加黄河的水源做出了贡献, 取得了明显的经济效益和社会效益。

我国人工增雨工作自从 20 世纪 50 年代末开展以来, 就是为了解决工农业生产过程中“水”的问题^[3]。经过 40 多年的发展, 人工影响作业和科研相结合, 在作业对象的选择、作业方法、探测手段等方面取得了一定的进展, 总体上已成为全国各地解决干旱问题的首选方法。然而, 像青海省人工影响天气办公室这样为解决黄河水的问题及黄河上游生态环境保护而开展的人工增雨工作, 在全国还是首次, 是人工增雨工作在新领域的拓展。由于自然成云降雨过程的复杂性, 各种不确定因子的共存, 使得人工影响天气作业对象、作业时机的选择以及作业效果的评估极为困难, 这些都是人工影响天气研究的基础理论和方法没有新的重大突破而造成的, 急需新的理论、方法来进一步研究这些问题。

曾庆存提出的自然控制论, 为我们进一步开展人工影响天气科学的研究, 提出了一个新的途径和方法^[4~6]。自然控制论研究的是自然环境的自控行为与人工调控的机理以及人工调控的理论、方法和技术, 以解决人类面临的环境和发展问题, 达到人类与自然环境的协调和持续发展。有害天气形成的自然机理及人工消除的理论和方法, 自然属于自然控制论研究的范畴, 这样一来就把已有的传统的云动力学及调控手段和最新的、严谨的控制论、规划论等方法结合起来, 既用到了气象学的已有成果, 又增加了例如反馈

2001-08-25 收到

^{*} 中国科学院百人计划“自然控制论研究”及青海省人工影响天气办公室“黄河上游人工增雨技术研究”资助

控制、最优规划等新方法,从而开辟出一种既可定量、又可检验的控制天气的研究途径。

本文利用自然控制论的理论来全面审视黄河上游有限区域人工增雨工作,希望对作业区域的选择、作业方案、效果检验、探测方法等问题给出合理的论证。

2 解决黄河断流问题总的提法

从自然控制论的基本观点出发,将影响黄河水量的因子分为两大类,即自然变量和人文变量。从整个黄河流域来考查,在这一点 P ,某一时刻 t ,影响黄河水径流量 R 的自然变量有上游的来水量 $L_{来}$ 、本地的汇水量 $L_{汇}$ 、本地的蒸发量 E_v 、本地的蓄水量 $L_{蓄}$ (包括渗水量),而人文变量(即人类活动影响黄河水的流量)有农业用水量 $L_{农}$ 、工业用水量 $L_{工}$ 、生活用水量 $L_{生}$,即:

$$R = F(P, t, L_{来}, L_{汇}, E_v, L_{蓄}, L_{农}, L_{工}, L_{生}).$$

总的问题提法应为在一定条件下, R 为最大。具体分析各个量的变化及影响因子,对黄河某一点而言,上游来水量受本点上游各种因子的制约;本地的汇水量则完全受制于当地的资源环境,如降水量、地表土壤、森林的蓄水能力、渗透成地下水的的能力等。从整个水体的循环考虑,降水量是主要地表径流的补充源泉。要增加汇水量,只有增加降水量才是解决问题的有效途径。暂且不考虑如何增加降水,仅从地域上考虑在何处增加降水,才可使黄河断流问题得以解决。

如图1所示,将黄河分为上、中、下游三部分。上游从源头起到兰州,包括河曲部分;中游为河套地区,从兰州到小浪底;下游为小浪底到黄河海口。

由于黄河下游为冲积扇平原,河水所携带的大量泥沙在这一区域淤积,使得河床逐

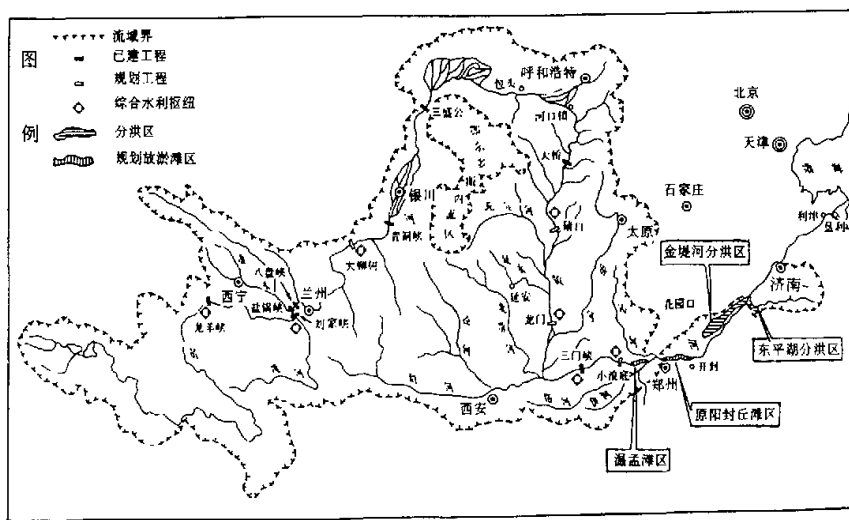


图1 黄河流域示意图(引自文献[1])

年抬高, 成为举世闻名的地上“悬河”^[1]。因此, 在这一区域增加地面降水, 并不能增加黄河的汇水量, 仅能使得这一区域农业的用水量减少。黄河断流也主要发生在这一区域, 在这一区域增加降水, 解决不了黄河的断流问题, 只有从其中游和上游入手。

考查黄河中游河套地区, 这一地区是黄河泥沙的主要源区。由于黄土高原植被、森林的破坏, 地表植被覆盖较差, 水土流失严重, 且这一地区多年平均降雨量在 600 mm 以下, 降水时间主要集中在夏季, 增雨时段较短。所形成的径流, 主要汇集在三门峡库区中, 且这段时间正是黄河防洪期。另外, 从图 1 也可知, 黄河上的阶梯水电站, 主要分布在三门峡水库以上的区域, 从防淤发电的角度看, 在此区域为解决黄河断流而开展人工增雨工作, 条件不十分理想。

黄河上游地区属青藏高原, 在这一区域, 黄河水系水资源总量年均 295.57 亿 m^3 , 占黄河年均径流量 (560 亿 m^3) 的 53%^[7], 水资源开发条件好。已建成有龙羊峡、刘家峡等大型水电站, 增加降水后的经济效益好。且这一区域的植被和土壤覆盖较好。因此, 要解决黄河断流问题, 应在这一区域开展人工增雨工作。

3 具体增雨作业区问题的提法

在上一节中, 我们仅在地域上讨论了在何处增加降水对解决黄河断流问题有效, 并没有考虑如何增加降水。在本节中, 我们将结合有关选择人工增雨条件已有的研究结果, 讨论在黄河上游地区开展人工增雨作业的最佳区域。

自 20 世纪 40 年代, 与贝吉龙 (Bergeron) 效应相关的过冷云催化理论的发展, 使得人工增雨工作成为现实^[8]。这一理论至今仍然是我们对过冷云进行人工催化的理论根据。有合适的云系是实施人工增雨作业的必要条件。

欲使流入黄河水量即汇水量增加, 除降水量增加外, 地表性质也是一个关键的因素。已有的研究^[8,9]表明, 降雨量大的地区, 水汽充沛, 云量多, 实施人工增雨作业的机会也多; 地表为沼泽或丘陵地带, 则降雨后易形成径流; 植被覆盖较好, 则汇流速度稳定, 经植被调节, 形成稳定的地下径流, 补充给黄河干流。据此, 我们将青藏高原黄河汇水区划分为 I 个小区域 (Ω_i), 则有

$$\Omega = \sum_{i=1}^I \Omega_i,$$

其中, Ω 为整个青藏高原黄河流域汇水区。若在黄河流经 Ω 的边界上设一观测点, 记该点黄河水流量为 F , 则在自然状况下,

$$F_{\text{自}} = f(R_{\text{自},i}, S_{\text{自},i}), \quad i = 1, 2, \dots, I,$$

其中, $R_{\text{自},i}$ 为第 i 个区域中的自然降水量, $S_{\text{自},i}$ 为第 i 个区域中的各种自然变量, 如下垫面性质、蒸发量、蓄水能力、渗透成地下水的能力等综合的自然因子。若在第 i 区域实施人工增雨作业后, 所增加的降水量为 $R_{\text{增},i}$, 则由于人工影响, 或曰人工控制后所导致的黄河水流量为

$$F_{\text{控}} = f(R_{\text{自},i} + R_{\text{增},i}, S_{\text{自},i}), \quad i = 1, 2, \dots, I.$$

由此可导出在人工增雨后黄河水流量的增加值为

$$\Delta F = F_{\text{控}} - F_{\text{自}},$$

若取一阶近似, 可得:

$$\Delta F \approx \sum_{i=1}^I \frac{\partial f(R_{\text{自},i}, S_{\text{自},i})}{\partial R_{\text{自},i}} R_{\text{增},i}, \quad i = 1, 2, \dots, I.$$

上式若对降雨增量 $R_{\text{增},i}$ 求导, 可得:

$$\frac{\partial \Delta F}{\partial R_{\text{增},i}} = \frac{\partial f(R_{\text{自},i}, S_{\text{自},i})}{\partial R_{\text{自},i}}, \quad i = 1, 2, \dots, I.$$

最终引出自然控制论中关于控制的一个敏感性问题, 即在何区域实施人工增雨, 可以使黄河水流量变化最大, 亦即求 i_0 , 使

$$\frac{\partial f(R_{\text{自},i_0}, S_{\text{自},i_0})}{\partial R_{\text{自},i_0}} = \max_{1 \leq i \leq I} \frac{\partial f(R_{\text{自},i}, S_{\text{自},i})}{\partial R_{\text{自},i}}.$$

函数 $F_{\text{自}} = f(R_{\text{自},i}, S_{\text{自},i})$ 及其导数很可能是分段连续的, 可用不同的方法来得到。最常用的是统计回归法, 用各个区域历史上多年降水、下垫面和黄河水流量资料建立一个统计意义上的关系式, 可方便地导出 $f(R_{\text{自},i}, S_{\text{自},i})$ 以及 $\partial f(R_{\text{自},i}, S_{\text{自},i}) / \partial R_{\text{自},i}$ 。如果区域划分比较细, 则这一步工作必须做。

如果区域划分比较粗, 可用简单的系统分析方法来处理。由气候统计知, 青藏高原年降水量约为 10 000 亿 m^3 , 大部分水汽来自印度洋的暖湿气流, 在水汽深入高原的途中, 受地形的影响, 高原东部边缘降雨量较大, 由东南向西北逐渐减少 (见图 2)。而黄河汇水区域年降水量大于 600 mm 的区域主要位于黄河河曲地区的东端; 若考查 Ω 内的地表性质, 青藏高原区域内的植被基本为牧草, 覆盖度较好, 而河曲地区为丘陵地带, 牧草生长好, 降雨后形成稳定的径流, 同时这一地区还存在大量的沼泽地, 降雨后可迅速形成径流。因此, 从降雨量和地表性质来考虑, 河曲地区东端为最佳增雨区。

4 河曲地区有限区域人工调控天气问题的提法

河曲地区人烟稀少, 经济发展相对落后, 工农业生产活动很少。增加降水对工农业生产活动的影响这一因子可不考虑。这一区域基本为高寒牧区, 增加降水对牧草的生长有利, 但对牲口的生长有一定不利的影响, 若从黄河全流域因增加黄河汇水量而对中下游工农业生产所产生的效益而言, 这一点影响是微不足道的, 故也可忽略不计。因此, 调控本地天气的中心问题是增加降水以使黄河水的径流量增加。现针对增加降雨问题从以下几个方面讨论。

4.1 正问题的提法

根据描述物理过程的控制方程、初始条件、边界条件而求解物理过程未来发展变化的问题, 通称为正问题。具体到降水问题, 根据大气运动方程、连续性方程、状态方程、热流量方程、水汽或加上云雨水守恒方程而构成的各种天气模式, 都是求解正

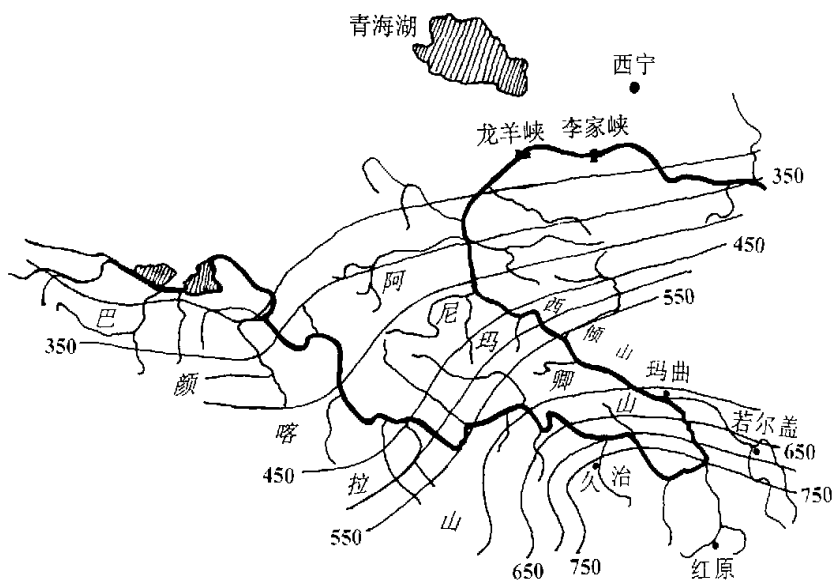


图2 黄河上游地区降水量图

问题。在不同简化条件下, 所得到的解都是对真实自然状态的一种逼近。再详细一点, 考虑到人工催化过程, 实际是在过冷云中播撒冰晶以使云通过贝吉龙过程转化成水滴以增加云的降水量或使不降水云转为降水云。其核心问题是在云的适当部位增加冰晶。描述人工增雨过程的数值模式, 还要加上冰核浓度守恒方程。在一定的假定和简化下, 描述降水过程的方程组为

$$X(p, t) = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T,$$

其中, $x_1, x_2, \dots, x_n$ 分别代表风速 u, v 、温度 T 、云水含量 Q_r 、雨水含量 Q_c 、自然冰晶 Q_i 等描述降水的各种自然量。而对人为变量, 有

$$Y(p, t) = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T,$$

其中, $y_1, y_2, \dots, y_n$ 分别为人对天气系统各量施加的影响量。由于人类活动能力及经费的限制, 在人工增雨过程中仅仅是对自然云系中敏感部位的冰晶数目加以改变, 使得降雨量增加。这一目的可表述为

$$F(Q_r, Q_{A,i}) = \text{最优},$$

相伴的限制条件为

$$\|Q_{A,i}\|^2 \leq C,$$

其中, $F(Q_r, Q_{A,r})$ 表示人工增加的冰核与降水的关系, C 为某一定值, 对应于经费的限制。

由于人类对自然界认识的局限, 还不可能求解包括从分子运动尺度、湍流尺度、到天气尺度的完整气体运动方程, 以及从云凝结核、冰核到云滴、雨滴、冰晶、雪花等所有粒子态的守恒方程。因此, 对这些量的描述方程都是在一定假设和简化下得到的, 即使我们有了描述这些物理量变化的精确方程, 但由相对性理论及测不准原理, 从物理原理上考察, 我们也提供不了这些物理量的初值。因此, 困扰人工增雨作业的一个大难题是如何正确预报自然降水量, 这样才能确定人工增雨的效果, 要达到这一目标, 只有在现有的基础上, 进一步改进数值预报模式或增加模式的分辨率或改进初值测量的准确度。

对中尺度模式而言, 要提高河曲地区的自然降雨预报的准确率, 首先是选择比较好的坐标系统如 η 坐标, 其次是增加模式的分辨率, 再次是提高初值的精度, 还要改进对各物理量的近似或假设, 使之更符合实际。具体而言, 由于青藏高原地区生存环境较差, 探空站稀疏, 在现有的条件下, 把卫星探测所得云际风资料导入模式的初值中, 是提高模式预报准确性的一个可行方案。

对于不同的云系, 可采用不同的预报模式, 如对系统性层状云天气过程, 可在中尺度预报结果上, 运行详细分档的层状云模式, 以解决冷云催化的冰核含量问题, 使得贝吉龙过程能真实地反映在数值模式中。

对于对流云, 可用能详细描述积云发展的对流云模式, 尽可能精确地给出初始扰动的位置、强度以及范围, 以确定人工增雨作业的最佳时机和作业部位。

4.2 反问题的提法

由于自然界变化的复杂性以及人们测量精度的限制, 自然降雨量的准确预报仍是一大难题。例如, 对积云降水的预报, 在同一层结分布的条件下, 所给积云模式初始扰动值不同, 所计算出的积云发展状况也不同, 即降雨量不同。这和自然界的实际状况也是相符的。在同一天, 我们可看到发展状况不同的对流云, 有的发展成为降水云, 甚至还会降冰雹, 而有很大一批积云, 不会降雨。这主要受制于该块积云最初所受到的初始扰动的强度和范围, 即初值问题。

同样对于层状云而言, 在同一天气系统的控制下, 不同地点降雨量是有差别的。研究^[3]表明, 制约层状云降水的主要因子是大尺度的强迫抬升运动。垂直上升运动空间分布的不同造成了降雨量空间分布的不同。

对这两种情况, 若要得到准确的模式预报结果, 从物理的角度来讲, 对于积状云, 是如何确定积云的初值状况; 对层状云而言, 是如何确定垂直上升速度的时空分布问题, 这些都是典型的物理反问题。而积云、层云模式的方程组, 本身已经是非线性方程组, 只有用数值方法求数值解。因此, 求解积云初始扰动问题和层云垂直速度的时空分布这样的反问题, 也只有用数值方法求解。

由于以往的研究只限于正问题的求解, 物理上的反问题研究还很少, 在气象学领域还没有这一方面研究的先例。我们用自然控制论的观点, 首次提出这一值得研究的问题, 若能很好加以解决, 则对人工增雨作业部位、方法特别是效果检验等困扰我们多年的问题将会得以彻底解决。

5 青藏高原河曲地区人工增雨模型

为了解决一般人工增雨作业难以解决的几个问题, 如作业对象、时机、部位、剂量及效果检验等问题, 特从自然控制论的角度出发, 提出本模型, 以期使上述问题能有一比较好的解答, 为实际工作从理论上做出指导。

5.1 探测及数据传输系统

要改造自然, 必先认识自然。有效的探测系统是获取自然过程信息的必备条件。制约中尺度天气系统数值预报模式精度的一大问题是初始场的准确性。除了模式本身的物理过程结构等问题外, 若能准确提供天气过程的信息, 必将使模式的预报能力有很大的提高。具体到青藏高原, 由于探空站稀少, 由此得出的初始场不能充分描述实际大气在中尺度模式所能描述尺度下的大气运动信息。在河曲人工增雨范围内, 离玛曲最近的探空站为红源, 其直线距离近 100 km, 不能很好代表作业区实际大气运动状况, 且位置偏南; 达日探空站虽处于玛曲县上游(西南方), 能在一定程度上表达出西风天气系统的有关信息, 但距离偏远, 超过 200 km, 因此建议在玛曲站或上游的河南县增设一探空站。为了加强中尺度模式预报的时效性, 在其他探空站稀疏地区, 可利用卫星资料反演的物理量场来修正初始大气初值场, 加强资料四维同化的研究, 以改进模式的预报精度。

在经费许可的情况下, 在地面布一个多波段微波辐射计网。随着现代科技的发展, 微波辐射计已能实时探测温度、水汽的垂直廓线, 精度可与常规探空站比美, 与雷达资料配合, 还可给出液态云水空间分布。特别是在青藏高原地区, 由于云底的温度接近 0℃, 微波辐射计所得到的液态水含量, 实际上就是云中的过冷水, 这正是人工催化的对象, 是其他探测手段难以提供的宝贵信息。

建立多参量雷达网: 可实时监控作业区内云的时空分布和演变过程, 提取云内的有关粒子相关信息, 为催化作业提供参考。

飞机直接测量系统: 作业前探测, 为优化作业提供直接的云微物理结构资料; 作业后探测, 为进行催化效果的物理检验提供证据。

地面雨量及雨滴谱收集网: 为催化效果检验提供有效的证据。

高效可靠的数据信息网: 以保证能及时快速地将各测站所探测到的资料传输到指挥中心, 经处理后, 将下一步催化作业的指令和探测指令下传到各作业点和探测点。

5.2 决策中心

决策中心的核心是一整套数值模式、资料处理系统和高速计算机系统。应选择, 发展、改进一套适合于青藏高原特定地形的中尺度数值预报模式, 网格分辨率应尽可能细。在天气系统到来之前就开始运行该模式, 并随时将有关的探测资料, 如卫星探测到的云际风资料, 微波辐射计探测到的温、湿、压场结构, 随时同化到该模式中, 以提高模式的预报准确率。根据模式预报的结果, 做出启用雷达、飞机、探空站加密探空的时间和间隔, 提前作好准备。

当天气系统临近时, 根据中尺度模式预报的结果和实际观测资料, 决定启用描述小尺度过程的积云模式或层状云模式, 并同时开展加密观测。

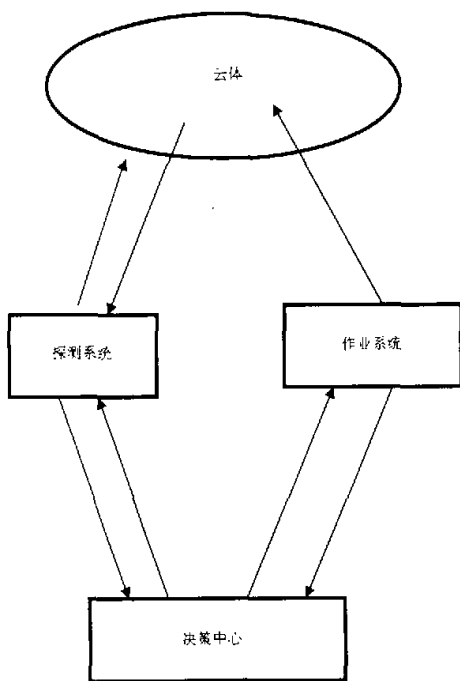


图3 人工增雨模型示意图

对于对流云系统,应着重观测作业区内不同云块的发展及演变。由探测结果来启动求解对流云初值问题的反问题模式,以尽快获得该云发生的初值。在此基础上,用描述积云发展过程问题的模式模拟其将来的发展及演变,同时选择合适的作业时机、部位和催化剂量,适时发布命令指挥作业;加强观测,将观测到的催化后云体变化与数值模式模拟结果相比较以决定下次作业的方案。如此循环达到最大限度增雨的目的,同时也获得了作业后的效果检验。

对于层状云系统,应着重观测云系的厚度、高度及空间分布,应用微波辐射计、雷达、飞机等资料得出云中含水量的分布,以此为根据,求解层状云反问题的数值模式,得出垂直上升速度的时空分布,然后启动层云过程正问题的数值模式,模拟出云系未来的发展和降雨量。由此可得出人工催化的各种决策,类似于对流的云过程,观测作业后

云体的变化、降雨量、滴谱的改变为下次作业方案的确定提供参考。将数值模式模拟的结果和实际观测值相对比、相反馈,以达到预期的目的。具体的流程及反馈过程如图3所示。

6 结论

本文用自然控制论的观点和方法讨论了黄河上游人工增雨作业的地域、地区选择,人工增雨作业问题的提法及有限区域人工增雨作业模型。结果表明:

(1) 从自然控制论的观点看,为了解决黄河断流问题,人工增雨的最佳地域为黄河上游,最佳地区为河曲地区东部。

(2) 通过对人工增雨工作正、反问题的讨论,指出在正问题研究的基础上,只有发展反问题的研究及反问题数值模式的建立,才可做到定量预报。

(3) 建立了一个有限区域人工增雨的模型。只有通过探测手段和动力研究手段找到控制敏感的点和方式而确定作业对象,然后应用有效的作业方法,连续地通过检查以检验作业效果,把这些观测检验量再反馈输入到计算中,从而决定随后的作业方案。这一模型可为有限区域人工增雨作业工作的具体实施从理论和方法上提供指导。

参 考 文 献

- 1 尤联元, 黄河流域生态环境特征与河道治理, 中国水问题研究, 北京: 气象出版社, 1996, 58~66.
- 2 钱伟宏, 黄河源头及上游地区人工增雨控制生态环境退化的研究报告, 青海省黄河上游人工增雨文集, 北京: 气象出版社, 1999, 55~71.
- 3 顾震潮, 云雾降水物理基础, 北京科学出版社, 1980.
- 4 曾庆存, 自然控制论, 气候与环境研究, 1996, 1(1), 11~20.
- 5 曾庆存, 自然控制论, 中国科学院院刊, 1996, 1(1), 16~21.
- 6 曾庆存, 自然控制论, 科技导报, 1996, No.11, 3~8.
- 7 沈大军, 青藏高原水资源及其评价, 中国水问题研究, 北京: 气象出版社, 1996, 42~49.
- 8 章澄昌, 人工影响天气概论, 北京: 气象出版社, 1992.
- 9 时兴合、张国胜等, 青南高原大气降水变化规律及其对黄河上游地区水资源的影响, 气候与环境研究, 2000, 5(2), 195~200.

Investigation of Artificial Precipitation Augmentation at the Upper Reaches of the Yellow River Based on Natural Cybernetics

Lei Hengchi¹⁾, Zeng Qingcun¹⁾, Li Lunge²⁾ and Zhu Jiang¹⁾

1) (Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

2) (Weather Modification Office, Meteorological Bureau of Qinghai Province, Xining 810001)

Abstract The water flow interruption of the Yellow River becomes a serious problem recently. The problems and solving scheme against the interruption of the Yellow River by increasing precipitation using weather modification was investigated based on the Natural Cybernetics. Results indicate that the artificial precipitation augmentation at the upper reaches of the Yellow River can relieve the interruption problem of the Yellow River and the optimum area for weather modification is the first bend of the Yellow River at upper reaches. In the light of artificial precipitation augmentation at the upper reaches of the Yellow River, the conception of direct and inverse problems of weather modification was firstly suggested. An ideal model for weather modification at this area was given.

Key words: natural cybernetics; Yellow River; weather modification.