



ELSEVIER
MASSON

Disponible en ligne sur
 ScienceDirect
www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France

www.em-consulte.com

PATHOLOGIE
BIOLOGIE

Pathologie Biologie 57 (2009) 503–508

Revue générale

Effets des ondes hyperfréquences des téléphones mobiles et des radars sur l'œil

Effects of mobile phones and radar radiofrequencies on the eye

R. Vignal ^{a,*}, D. Crouzier ^b, V. Dabouis ^b, J.-C. Debouzy ^b

^a Service d'ophtalmologie, hôpital militaire Bouffard, SP 85024, 00812 Armées, France

^b Unité de biophysique cellulaire et moléculaire, centre de recherche du service de santé des armées,
24, avenue des Maquis-du-Grésivaudan, 38702 La Tronche cedex, France

Reçu le 25 août 2008 ; accepté le 18 septembre 2008

Disponible sur Internet le 25 novembre 2008

Résumé

La multiplication des sources de microondes entraîne une augmentation du nombre de personnes exposées, parfois source d'inquiétude. Les globes oculaires, par leur anatomie et leur composition, sont des cibles privilégiées de ces ondes. Une revue des différentes études sur les effets sur l'œil est proposée. Leur comparaison est difficile en raison des différents modes d'exposition, des différentes puissances et des dosimétries utilisées. Si les effets thermiques sur l'œil sont bien décrits comprenant cataractes, œdème cornéen, iritis, perte endothéliale et dégénérescence rétinienne, les effets non thermiques pour des expositions chroniques sont discutés. Observés dans des conditions expérimentales avec des modifications biochimiques, des anomalies de réplication cellulaire, des apoptoses précoces dues probablement à un stress oxydatif, aucune étude sur l'homme n'a mis en évidence d'effet délétère significatif chez des sujets exposés de façon chronique à de faibles doses. Les futures études doivent se rapprocher des conditions d'exposition humaine pour pouvoir en extrapoler les résultats à l'homme et adapter les normes de protection.

© 2008 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Abstract

The increasing applications of microwaves, mainly in mobile phones and radar, induce a higher rate of exposed people, sometimes cause of worry. Eyeballs are hotspots of radiofrequency field radiation because of their anatomy and composition. We propose a review of the various effects on the eye. The studies are hardly comparable because the exposure systems, power densities and dosimetries are different. While the thermal effects on the eye are well known including cataracts, corneal edema, endothelial cell loss and retinal degeneration, the non-thermal effects are still controversial. Cell cycle abnormalities, early apoptosis were reported in experimental conditions likely due to oxidative stress, but the studies could not show any significant effect on human eyes when exposed to long-term and low-dose radiation. Next studies need to be closer to human exposure.

© 2008 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Mots clés : Effets oculaires ; Microondes ; Études sur l'homme ; Cataracte ; Cornée rétinie

Keywords : Ocular effects; Microwaves; Human studies; Cataract; Cornea; Retina

1. Introduction

Les sources électromagnétiques, et plus particulièrement les champs hyperfréquences (HF) ou microondes dont les

fréquences se situent dans la gamme 300 MHz–300 GHz, sont devenues omniprésentes dans les sociétés industrielles actuelles.

Initialement réservées à de rares utilisations militaires après la guerre (détection radar et communication essentiellement), l'utilisation des champs microondes s'est peu à peu étendue pour gagner progressivement l'industrie, le milieu médical, les foyers et, récemment, la communication individuelle avec

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : rodolphevignal@yahoo.fr (R. Vignal).

l'avènement de « l'ère sans fil » matérialisée par le succès des téléphones portables Global System for Mobiles (GSM).

Ce développement a entraîné directement une augmentation du nombre de personnes exposées, du temps d'exposition moyen, de la gamme de fréquences subie et globalement de la quantité de rayonnements absorbés. L'existence d'un faible risque pour la santé au niveau individuel pourrait alors se traduire par des conséquences non négligeables au niveau d'une population.

Les globes oculaires sont des cibles privilégiées des ondes électromagnétiques en raison, d'une part, des longueurs d'onde de celles-ci, proche de la taille des constituants de l'œil (cornée, cristallin), d'autre part, de la mauvaise dissipation de la chaleur au niveau de ces mêmes organes qui ne sont pas vascularisés.

Après un rappel sur les microondes, une revue des différents effets sur l'œil démontrés ou suspectés dans des conditions expérimentales, puis chez l'homme est proposée, suivie d'une discussion.

2. Rappel sur les champs électromagnétiques

Les ondes électromagnétiques sont caractérisées par plusieurs paramètres physiques indispensables à prendre en compte pour comparer les études ; à savoir, la fréquence des ondes, leur puissance et la mesure de l'effet biologique sur le tissu (dosimétrie) (Tableau 1).

Les fréquences concernées par les microondes se trouvent dans la bande 300 MHz–300 GHz, soit une longueur d'onde variant respectivement de 1 m à 1 mm.

Les effets les plus étudiées ont ainsi été les ondes radar, puis les ondes des fours à microondes (2450 MHz) et, désormais, les ondes GSM.

Le meilleur indicateur de la puissance est la densité surfacique d'absorption ou DSP qui correspond à la puissance traversant une surface de 1 m², elle s'exprime en W/m².

La quantité d'énergie absorbée par le tissu semble être le paramètre le plus important pour étudier les interactions avec les tissus. Ainsi, le débit d'absorption spécifique (DAS ou SAR pour l'acronyme anglo-saxon) a été officiellement désigné

comme paramètre dosimétrique de référence par la communauté scientifique. Le DAS est défini comme étant la puissance absorbée par unité de masse, il s'exprime en Watt par kilogramme.

Il est possible de différencier trois grandes catégories d'effets biologiques.

Les effets thermiques sont directement liés à la quantité d'énergie dissipée dans l'organisme ; ils apparaissent, pour des densités de puissance importantes, supérieures ou égales à 4 W/kg.

Les effets non thermiques sont des effets observés sur les systèmes biologiques, alors que la quantité d'énergie absorbée est trop faible pour induire une élévation de la température. Ainsi, on parle d'effets non thermiques ou spécifiques pour des effets observés à des puissances inférieures à 4 W/kg. Ils apparaissent généralement suite à des expositions de longues durées et nous intéressent particulièrement ici, mais leur existence reste actuellement controversée.

Contrairement aux effets thermiques, le mécanisme de ces effets n'est pas connu avec certitude et semble avoir des origines multiples.

Indépendamment de leurs effets directs thermiques ou non sur les êtres vivants, les microondes peuvent avoir des effets indirects, notamment électriques, mais aussi lors de la présence de corps métalliques qui focalisent les champs électromagnétiques.

Des limites d'expositions aux champs électromagnétiques ont été formulées dès les années 1980, par l'International Commission of Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). À partir de ces recommandations, chaque pays a pu établir ses propres normes et directives [1–3].

Ces limites ont été formulées à partir des risques aigus avérés, directement mis en évidence et reproductibles, elles ont donc été formulées à partir des effets thermiques. La valeur limite correspond ainsi à la valeur la plus basse à laquelle apparaît un effet, divisée par un coefficient de sécurité permettant de tenir compte des diverses incertitudes.

Les restrictions actuellement en vigueur ne sont pas figées, et peuvent évoluer en fonction des recherches scientifiques actuellement en cours.

Tableau 1
Classification des fréquences du spectre électromagnétique.

Fréquence ou longueur d'onde	Gamme	Exemple d'applications
0 Hz	Champs statiques	Électricité statique
50 Hz	Extrêmement basses Fréquences	Lignes électriques et courant domestique
20 kHz	Fréquences intermédiaires	Écrans vidéo, plaques à induction culinaires
88–107 MHz	Radiofréquences	Radiodiffusion FM
300 MHz–300 GHz	Hyperfréquences ou microondes	Téléphones analogiques (400–800 MHz) GSM (900–1800 MHz) UMTS (1900–2200 MHz) Four à microondes (900–2450 MHz) Radar (3–100 GHz)
300 GHz–10 ⁵ GHz	Infrarouges	Détecteur antivol, télécommandes
10 ⁵ –10 ⁶ GHz = 0,8–0,4 μm	Visible	Lumière, lasers
0,4–0,01 μm	Ultraviolets	Soleil, photothérapie
10,1–10,2 μm	Rayon X	Radiologie
< 10,2 μm	Rayon γ	Physique nucléaire

3. Effets sur l'œil dans des conditions expérimentales

3.1. Effets sur le cristallin

Après les controverses survenues après guerre jusque dans les années 1960, il est devenu évident que l'exposition aux microondes pouvait amener à des lésions cornéennes et cataractes via des effets thermiques [4–7]. Les effets sur le cristallin avec l'apparition d'une cataracte sont bien connus mais seulement pour des effets thermiques, qui nécessitent de fortes énergies moyennes (> 150 W/kg) avec des temps d'expositions supérieurs à 30 minutes qui entraînent des températures intravitréennes supérieures ou égales à 41 °C. Ces effets ont été reportés chez l'animal principalement pour des expositions uniques longues à très fort DAS, ce qui ne correspond pas à la réalité d'une exposition professionnelle chez l'homme, mais a permis d'établir des normes de protection (ICNIRP).

Cependant, certaines études ne corroborent pas ces effets [8]. Saito et al. [9] ne retrouvent pas de cataracte après une exposition des yeux de lapins à des microondes (2,45 GHz) continues avec un DAS de 26,5 W/kg pendant 160 à 240 minutes, mais des signes plus antérieurs, myosis (premier signe) œdème cornéen, décollement de l'endothélium cornéen et œdème conjonctival.

Les effets non thermiques demeurent un réel problème de santé publique de par l'omniprésence des champs de microondes de faible puissance, mais leurs effets nuisibles restent très controversés.

Les questions sont liées à l'existence de lésions méconnues pour des niveaux compatibles avec les normes en vigueur et, surtout, au rôle joué par la nature du rayonnement (continu ou impulsionnel). Des études effectuées sur des cristallins en culture évoquaient, dès les années 1980, des possibilités d'action différentes liées à une nature impulsionnelle du rayonnement dans la survenue de cataractes [10].

L'étude de Dovrat et al. [11], réalisée sur des cristallins en culture (DAS environ 1,5 W/kg) avec un contrôle de température à 35 °C, montre que l'exposition peut induire deux types d'effets : une modification de la transmission optique des cristallins, saturable et réversible ainsi qu'un second effet, non réversible détecté le long des sutures du cristallin sous forme de microbulles. Les effets semblent plus marqués avec les rayonnements impulsionnels que les rayonnements continus.

Les effets chroniques ont aussi été étudiés à puissance moyenne. McAfee et al. [12,13] ont exposé des singes pendant une période de quatre mois avec soit une fréquence de 2,45 GHz, soit une fréquence de 9,31 GHz et des DAS respectivement de 20 et 40 W/kg et n'a pas retrouvé d'effet clinique. Dans une autre étude, des lapins exposés une heure par jour pendant 20 jours à une DAS élevée (150 W/kg) ont développé des cataractes [4].

Certaines modifications biochimiques et biomoléculaires semblent sous-tendre les différents effets. Plusieurs études ont montré une diminution de l'acide ascorbique au niveau du cristallin à la suite d'une exposition cataractogène qui serait

directement due à un effet thermique [14,15]. De même, pour des expositions importantes, certains auteurs ont retrouvé un arrêt de la synthèse d'ADN et des mitoses des cellules épithéliales cristalliniennes [16].

Le stress oxydatif cristallinien et les conséquences sur l'ADN des cellules épithéliales sont au centre des études depuis quelques années, avec l'apparition de techniques d'exploration des lésions de l'ADN et d'exploration in vivo des tissus, ainsi qu'en raison du regain d'intérêt scientifique pour les ondes électromagnétiques GSM. Plusieurs études en 2002 [17], 2003 [18] et 2004 [19] mettent en évidence une apoptose des cellules épithéliales cristalliniennes plus importante dans le groupe exposé par rapport au groupe non exposé pour des microondes de faible densité de puissance (50 et 100 W/m²). Cependant, le DAS n'était pas établi. D'autres études récentes [20,21] mettent en évidence des altérations de l'ADN des cellules épithéliales cristalliniennes responsables de leur apoptose pour un DAS de 4 W/kg et qui pourraient être dues à une production de radicaux libres. Ces effets semblent réversibles pour les DAS les plus faibles, on assiste aussi à la mise en place de mécanismes de protection de l'ADN comme la production de *heat shock protein*. L'exposition chronique semble induire un stress oxydatif au niveau de cristallins de rats exposés à des ondes GSM pendant quatre semaines. L'ingestion de vitamine C a permis, lors de cette étude, de prévenir cet effet [22].

3.2. Effets sur la cornée

3.2.1. Des effets thermiques ont été décrits

Les ondes millimétriques de fréquence importante (radar) entraînent, en revanche, des lésions cornéennes, car elles pénètrent peu dans les tissus et peuvent induire des DAS très élevées sur de petites zones. Chaffin et al. [8] retrouvent des lésions cornéennes chez le singe à partir d'une DSP de 5,5 J/cm² pour une fréquence de 35 GHz et de 5 J/cm² pour une fréquence de 94 GHz. Saito et al. [9] ne retrouvent pas de cataracte après une exposition des yeux de lapins à des microondes (2,45 GHz) continues avec un DAS de 26,5 W/kg pendant 160 à 240 minutes, mais des signes plus antérieurs, myosis (premier signe), œdème cornéen, décollement de l'endothélium cornéen et œdème conjonctival.

Les effets non thermiques sont très mal connus aussi pour la cornée. Kues et al. [23] retrouvent des lésions de surface pour une fréquence de 2,45 GHz pulsée et un DAS de 2,6 W/kg avec altérations épithéliales et endothéliales, ainsi qu'une dilatation des vaisseaux iriens. Cependant, aucune étude n'a ensuite retrouvé d'altérations cornéennes pour des DAS aussi faibles [24,25], d'une part, en raison peut-être de l'effet de l'anesthésie générale lors de l'exposition dans l'étude de Kues et al., d'autre part, en raison de l'importance des pics des ondes pulsées qu'ils ont utilisées.

Un stress oxydatif accru est aussi présent au niveau de la cornée lors d'une exposition chronique à des ondes GSM, prévenu par l'ingestion de vitamine C [22].

3.2.2. Effet sur la rétine

Les études sur les effets thermiques sont contradictoires et peu nombreuses.

Kues et al. [23] ont retrouvé des lésions rétinienne qui n'ont ensuite pas été retrouvées par ces mêmes auteurs. Paulsson et al. [26] ont montré en microscopie électronique des modifications dégénératives rétinienne chez des lapins exposés à des microondes de 3,1 GHz pulsées, une DSP de 550 W/m² et un DAS à la rétine de 30 W/kg, attribuées aux effets thermiques.

Dans le cas des effets non thermiques lors d'exposition à des ondes GSM, un stress oxydatif a été décrit au niveau des cellules rétinienne, possiblement prévenu par l'ingestion d'antioxydants [27].

3.2.3. Effets sur l'homme

Des études de modélisation de l'œil humain [28–30] montrent qu'il faudrait des DSP de 1000 W/m² à 1,5 GHz GSM pouvant causer des DAS supérieures à 150 W/kg et des températures supérieures à 41 °C au niveau du cristallin ; ce qui est largement au-delà des doses maximales d'exposition autorisées. Pour des expositions normales, les DAS restent bien en dessous des limites légales, sauf dans les cas improbables d'exposition à l'aide d'une antenne directement sur l'œil et très proche de celui-ci. Les montures métalliques de lunettes aggraveraient l'effet thermique intraoculaire des ondes GSM (900 MHz) par effet indirect [31]. Cependant, ces études concernent des expositions uniques et recherchent des effets thermiques.

Les effets thermiques ont été décrits par Lim et al. [32] qui ont rapporté le cas d'un sujet exposé accidentellement à deux reprises pendant 15 minutes à des radiations de 6 GHz en inspectant un transmetteur satellite et qui a présenté des anomalies rétinienne (dysfonction des cônes), cornéennes et des brûlures faciales.

Des études épidémiologiques ont été réalisées principalement chez des ouvriers ou des militaires ou policiers [33]. Cleary et Pasternack [34] retrouvaient plus d'opacités cristalliniennes chez des ouvriers exposés aux microondes par rapport à un groupe contrôle. De même, Aurell et Tengroth [35] retrouvaient plus d'anomalies rétinienne et opacités cristalliniennes chez des ouvriers exposés. Mais plusieurs autres études n'ont pas retrouvé d'effet significatif [36,37].

Dans une étude de population de plus de 420 000 utilisateurs de téléphones portables pendant sept à 18 ans, aucune relation entre cancer oculaire et utilisation de téléphone portable n'a été établie [38]. Une seule étude plus ancienne a retrouvé une

association avec un risque de mélanome choroïdien deux fois supérieur pour les sujets exposés [39] (Tableau 2).

La limite de discrimination visuelle a été déterminée pour des expositions non thermiques à des ondes GSM [40]. Elle n'est pas modifiée lors de l'exposition à des ondes GSM.

Enfin, une enquête rapporte un nombre significatif de plaintes d'utilisateurs de téléphones portables en termes de larmoiement et vision floue [41].

4. Discussion

Les études manquent de reproductibilité en raison des différents systèmes d'exposition, des différents modèles et des conditions expérimentales (DAS, temps d'exposition, modèle) [42].

Les effets thermiques des ondes électromagnétiques sont indiscutables dans des conditions expérimentales et ont permis d'établir des normes de protection. Cependant, ces effets ont été décrits chez l'homme seulement pour des expositions accidentelles à très forte puissance. Les téléphones portables ne peuvent pas induire d'effets thermiques dans des conditions normales d'utilisation, même si la proximité d'objet métallique comme des montures de lunettes pourrait accentuer une augmentation de température intraoculaire.

Les effets non thermiques pour des expositions de faible DAS sont actuellement très discutés. Le stress oxydatif engendré par de telles expositions au niveau de la cornée, du cristallin et de la rétine pourrait avoir des conséquences sur l'ADN cellulaire et, ainsi, la multiplication et l'apoptose cellulaire dans des conditions expérimentales. Au niveau du cristallin, ces effets pourraient conduire à l'apparition d'une cataracte par un mécanisme semblable à celui de la cataracte sénile, à savoir une oxydation intensive des lipides et protéines du cristallin [43]. La production de radicaux libres lors des expositions chroniques aux radiations pourrait aussi favoriser l'apparition d'opacités cristalliniennes ou, au moins, de troubles de la transparence, même sans effet thermique.

Ainsi, des troubles de transmission lumineuse ont été retrouvés au niveau de cristallin de rat après exposition chronique [44].

Mais l'extrapolation à l'homme dans des conditions habituelles d'exposition aux microondes est difficile. Les modes d'exposition sont très différents, souvent indirects pour l'homme. Les effets dans les conditions expérimentales concernent des expositions sur de courtes périodes et sont souvent transitoires, alors que l'homme est, de nos jours, soumis pendant une grande partie de sa vie. Ainsi, manquent

Tableau 2
Niveau d'exposition aux rayonnements électromagnétiques dans le domaine des hyperfréquences.

Conditions d'exposition	Limites de DAS (W/kg) (10 kHz à 10 GHz)		Limite de densité de puissance à 1800 MHz	
	Travailleurs	Public	Travailleurs (W/m ²)	Public (W/m ²)
Corps entier (moyenne sur corps entier)	0,4	0,08	45	9
Tête, cou et tronc (moyenne sur 1 g de tissus)	10	2		
Membres (moyenne sur 10 g de tissus)	20	4		

des études expérimentales sur l'animal dans des conditions d'exposition proches de celles rencontrées dans certaines professions. Plusieurs points restent à étudier :

- les effets chroniques sur la cornée, notamment la perte des cellules endothéliales, et sur la rétine, notamment la dégénérescence maculaire ;
- les effets sur les cornées opérées de chirurgie réfractive ;
- les modifications biochimiques des différents milieux oculaires, désormais accessibles plus simplement à l'aide de techniques de résonance magnétique nucléaire perfectionnées [45,46].

Par ailleurs, des facteurs extrinsèques comme la nutrition peuvent avoir un rôle modulateur et sont très différents entre l'homme et l'animal.

Chez l'homme, les tests fonctionnels de diffraction de la lumière pour les milieux transparents et l'électrorétinogramme pour la rétine pourraient permettre de suivre et étudier simplement les personnes exposées.

Enfin, les études de cohorte sont indispensables en raison de l'intensification du réseau des microondes, de la précocité de l'utilisation des téléphones portables dès l'enfance.

5. Conclusion

L'exposition à des sources d'ondes électromagnétiques de plus en plus abondantes dans notre vie quotidienne s'accompagne d'une inquiétude d'une partie de la communauté scientifique. L'étude de l'effet de ces ondes sur l'homme est très difficile, en raison de la multiplicité des fréquences, des nombreuses conditions d'exposition et d'une dosimétrie délicate à établir. Il faut ainsi se placer dans des conditions d'exposition les plus proches de la réalité pour l'homme. Elles ont conduit jusqu'à maintenant à la mise en place de normes d'exposition, à la mise en évidence de possibles anomalies cornéennes, cristalliniennes et rétinienne par modification du potentiel *red/ox* cellulaire, mais sans parvenir à montrer d'effet délétère significatif sur l'homme dans des conditions habituelles d'exposition.

6. Conflits d'intérêts

Aucun.

Références

- [1] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. ICNIRP statement related to the use of security and similar devices utilizing electromagnetic fields. *Health Phys* 2004;87:187–96.
- [2] Institute of electrical and electronics engineers (IEEE). Standards for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields 3 kHz to 300 GHz, IEEE C95.1–1999 edition.
- [3] Directive 2004/04/40/CE du parlement européen et du conseil du 29 avril 2004 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques).
- [4] Carpenter RL. Ocular effects of microwave radiation. *Bull NY Acad Med* 1979;55:1048–57. 4.
- [5] Kramar P, Harris C, Emery AF, Guy AW. Acute microwave irradiation and cataract formation in rabbits and monkeys. *J Microw Power* 1978;13:239–49.
- [6] Kramar P, Harris C, Guy AW. Thermal cataract formation in rabbits. *Bioelectromagnetics* 1987;8:397–406.
- [7] Savić S, Postić-Grujin A, Zivancević S, Panov D. The effect of microwave radiation on the eye lens in rats. *Arh Hig Rada Toksikol* 1983;34:301–4.
- [8] Chalfin S, D'Andrea JA, Comeau PD, Belt ME, Hatcher DJ. Millimeter wave absorption in the nonhuman primate eye at 35 GHz and 94 GHz. *Health Phys* 2002;83:83–90.
- [9] Saito K, Saiga T, Suzuki K. Reversible irritative effect of acute 2.45 GHz microwave exposure on rabbit eyes—a preliminary evaluation. *J Toxicol Sci* 1998;23:197–203.
- [10] Creighton MO, Larsen LE, Stewart-DeHaan PJ, Jacobi JH, Sanwal M, Baskerville JC, et al. In vitro studies of microwave-induced cataract. II. Comparison of damage observed for continuous wave and pulsed microwaves. *Exp Eye Res* 1987;45:357–73.
- [11] Dovrat A, Berenson R, Bormusov E, Lahav A, Lustman T, Sharon N, et al. Localized effects of microwave radiation on the intact eye lens in culture conditions. *Bioelectromagnetics* 2005;26:398–405.
- [12] McAfee RD, Longacre Jr A, Bishop RR, Elder ST, May JG, Holland MG, et al. Absence of ocular pathology after repeated exposure of unanesthetized monkeys to 9.3-GHz microwaves. *J Microw Power* 1979;14:41–4.
- [13] McAfee RD, Ortiz-Lugo R, Bishop R, Gordon R. Absence of deleterious effects of chronic microwave radiation on the eyes of rhesus monkeys. *Ophthalmology* 1983;90:1243–5.
- [14] Kinoshita JH, Merola LO, Dikmak E, Carpenter RL. Biochemical changes in microwave cataracts. *Doc Ophthalmol* 1966;20:91–103.
- [15] Weiter JJ, Finch ED, Schulz W, Frattali V. Ascorbic acid changes in cultured rabbit lenses after microwave irradiation. *Ann NY Acad Sci* 1975;247:175–81.
- [16] Van Ummersen CA, Cogan FC. Effects of microwave radiation on the lens epithelium in the rabbit eye. *Arch Ophthalmol* 1976;94:828–34.
- [17] Ye J, Yao K, Zeng Q, Lu D. Changes in gap junctional intercellular communication in rabbits lens epithelial cells induced by low power density microwave radiation. *Chin Med J (Engl)* 2002;115:1873–6.
- [18] Ye J, Yao K, Lu DQ, Jiang H, Wu RY. A quantitative study on early changes in rabbit lens capsule epithelium induced by low power density microwave radiation. *Zhonghua Yan Ke Za Zhi* 2003;39:361–4.
- [19] Yao K, Wang KJ, Tan J, Xu W, Lu DQ. Low-intensity microwave blocks cell cycle and regulate cell cycle related gene expression in rabbit lens epithelial cells. *Zhonghua Yan Ke Za Zhi* 2004;40:836–40.
- [20] Yao K, Wu W, Yu Y, Zeng Q, He J, Lu D, et al. Effect of superposed electromagnetic noise on DNA damage of lens epithelial cells induced by microwave radiation. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2008;49:2009–15.
- [21] Sun LX, Yao K, Jiang H, He JL, Lu DQ, Wang KJ, et al. DNA damage and repair induced by acute exposure of microwave from mobile phone on cultured human lens epithelial cells. *Zhonghua Yan Ke Za Zhi* 2006;42:1084–8.
- [22] Balci M, Devrim E, Durak I. Effects of mobile phones on oxidant/antioxidant balance in cornea and lens of rats. *Curr Eye Res* 2007;32:21–5.
- [23] Kues HA, Hirst LW, Luty GA, D'Anna SA, Dunkelberger GR. Effects of 2.45-GHz microwaves on primate corneal endothelium. *Bioelectromagnetics* 1985;6:177–88.
- [24] Kamimura Y, Saito K, Saiga T, Amemiya Y. 1994. Effect of 2.45 GHz microwave irradiation on monkey eyes. *IEICE Trans Commun E77-B:762–765*.
- [25] Lu ST, Mathur SP, Stuck B, Zwick H, D'Andrea JA, Ziriak JM, et al. Effects of high peak power microwaves on the retina of the rhesus monkey. *Bioelectromagnetics* 2000;21:439–54.
- [26] Paulsson LE, Hamnerius Y, Hansson HA, Sjöstrand J. Retinal damage experimentally induced by microwave radiation at 55 mW/cm². *Acta Ophthalmol (Copenh)* 1979;57:183–97.
- [27] Ozguner F, Bardak Y, Comleckci S. Protective effect of melatonin and caffeic acid phenethyl ester against retinal oxidative stress in long-term

- use of mobile phone: a comparative study. *Mol Cell Biochem* 2006;282:83–8.
- [28] Hirata A, Matsuyama S, Shiozawa T. Temperature rises in the human eye exposed to EM waves in the frequency range 0.6–6 GHz. *IEEE Trans Electromagn Compat* 2000;42:386–93.
- [29] Kuwano S, Ishihara M. Body effects on SAR distributions for microwave exposures in a realistic model of the human head. *J Microw Power Electromagn Energy* 2007;40:155–64.
- [30] Taflov A, Brodwin ME. Computation of the electromagnetic fields and induced temperatures within a model of the microwave-irradiated human eye. *IEEE Trans Microw Theory Tech* 1975;MTT-23:888–896.
- [31] Yang L, Ge M, Guo J, Wang Q, Jiang X, Yan W. A simulation for effects of RF electromagnetic radiation from a mobile handset on eye model using the finite-difference time-domain method. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc* 2007;2007:5294–7.
- [32] Lim JJ, Fine SL, Kues HA, Johnson MA. Visual abnormalities associated with high-energy microwave exposure. *Retina* 1993;13:230–3.
- [33] Fink JM, Wagner JP, Congleton JJ, Rock JC. Microwave emissions from police radar. *Am Ind Hyg Assoc J* 1999;60:770–6.
- [34] Cleary SF, Pasternack BS. Lenticular changes in microwave workers. A statistical study. *Arch Environ Health* 1966;12:23–9.
- [35] Aurell E, Tengroth B. Lenticular and retinal changes secondary to microwave exposure. *Acta Ophthalmol (Copenh)* 1973;51:764–71.
- [36] Cleary SF, Pasternack BS, Beebe GW. Cataract incidence in radar workers. *Arch Environ Health* 1965;11:179–82.
- [37] Hathaway JA, Stern N, Soles EM, Leighton E. Ocular medical surveillance on microwave and laser workers. *J Occup Med* 1977;19:683–8.
- [38] Schüz J, Jacobsen R, Olsen JH, Boice Jr JD, McLaughlin JK, Johansen C. Cellular telephone use and cancer risk: update of a nationwide Danish cohort. *J Natl Cancer Inst* 2006;98:1707–13.
- [39] Holly EA, Aston DA, Ahn DK, Smith AH. Intraocular melanoma linked to occupations and chemical exposures. *Epidemiology* 1996;7:55–61.
- [40] Irlenbush L, Bartsch B, Cooper J, Herget I, Marx B, Raczek J, et al. Influence of a 902.4 MHz GSM signal on the human visual system: investigation of the discrimination threshold. *Bioelectromagnetics* 2007;28:648–54.
- [41] Balik HH, Turgut-Balik D, Balikci K, Ozcan IC. Some ocular symptoms and sensations experienced by long-term users of mobile phones. *Pathol Biol* 2005;53:88–91.
- [42] Elder JA. Ocular effects of radiofrequency energy. *Bioelectromagnetics* 2003;(Suppl. 6):S148–61.
- [43] Spector A. Oxidative stress-induced cataract: mechanism of action. *FASEB J* 1995;9:1173–82.
- [44] Prost M, Olchowik G, Hautz W, Gaweda R. Experimental studies on the influence of millimeter radiation on light transmission through the lens. *Klin Oczna* 1994;96:257–9.
- [45] Risa Ø, Saether O, Löfgren S, Söderberg PG, Krane J, Midelfart A. Metabolic changes in rat lens after in vivo exposure to ultraviolet irradiation: measurements by high resolution MAS 1H NMR spectroscopy. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2004;45:1916–21.
- [46] Risa O, Saether O, Kakar M, Mody V, Löfgren S, Söderberg PG, et al. Time dependency of metabolic changes in rat lens after in vivo UVB irradiation analysed by HR-MAS 1H NMR spectroscopy. *Exp Eye Res* 2005;81:407–14.